

ФГУП «НПО «Орион»



**XXII Международная
научно-техническая конференция,
школа молодых специалистов
и выставка
по фотоэлектронике
и приборам ночного видения**

22-25 мая 2012

Москва, Россия

ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИИ

XXII Международная научно-техническая конференция, школа молодых специалистов и выставка по фотоэлектронике и приборам ночного видения организована

*Государственным научным центром
Российской Федерации –
Федеральным государственным унитарным
предприятием «НПО «Орион»*

и проводится при поддержке:

*Министерства промышленности и торговли РФ,
Министерства образования и науки РФ,
Российской академии наук,
Правительства г. Москвы
Оптического общества им. Д.С. Рождественского*

Тематика конференции:

- полупроводниковые приемники излучения и формирователи сигналов изображения (физические исследования фотоприема и новых материалов; технология, включая электронную и ионно-плазменную; системы охлаждения и методы обработки сигнала);
- тепловые приемники излучения и формирователи сигналов изображения (физические исследования; технология; системы охлаждения и системы обработки сигнала);
- приборы ночного видения (на основе ЭОП и тепловизионные);
- микроэлектроника для фотоприемных устройств;
- новые направления и последние достижения в ИК-фотоэлектронике и приборах ночного видения (включая методы и средства измерения характеристик фотоэлектронных приборов);
- нанотехнологии и метаматериалы в оптике;
- специальное программное обеспечение для фотоэлектроники и оптики.

**XXII Международная научно-техническая конференция,
школа молодых специалистов и выставка
по фотоэлектронике и приборам ночного видения**

22-25 мая, 2012 • Москва, Россия

ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИИ

**Государственный научный центр Российской Федерации
Федеральное государственное унитарное предприятие НПО «Орион»
Москва, 2012**

Международный программный комитет

Председатель – Филачев А.М., ФГУП «НПО «Орион», Россия

Заместитель председателя - Пономаренко В.П., ФГУП «НПО «Орион»,
Россия

Заместитель председателя - Дирочка А.И., ФГУП «НПО «Орион», Россия

Ученый секретарь – Яковлева Н.И., ФГУП «НПО «Орион», Россия

Члены комитета:

Асеев А.Л. – ИФП СО РАН

Баранов Н.А. – РАРАН

Белоусов Ю.И. – филиал ФГУП «ЦНИИ «Комета», Россия

Бугаев А.С. – МФТИ, Россия

Бурлаков И.Д. – ФГУП «НПО «Орион», Россия

Быков В.А. – ФГУП «НИИ ФП», Россия

Гиндин Д.А. – ОАО «Завод «Сапфир», Россия

Гуляев Ю.В. – ИРЭ РАН

Елютин А.В. – ОАО «Гиредмет», Россия

Зверев Г.М. – ФГУП «НИИ «Полос», Россия

Иванов В.П. – ОАО «НПО «ГИПО», Россия

Каблов Е.Н. – ФГУП «ВИАМ», Россия

Крохин О.Н. – ФИ РАН

Крутиков В.Н. – ВНИИОФИ, Россия

Кудрявцев Н.Н. – МФТИ, Россия

Максин С.В. – ОАО «НПК «ОСТ», Россия

Мантуров Д.В. – Минпромторг РФ

Мисник В.П. – ФГУП «ЦНИИ «Комета», Россия

Орлов В.А. – МО РФ

Пожела Ю.К. – ИФП, Литва

Попов Г.Н. – ЦКБ «Точприбор», Россия

Потапов А.В. – Минпромторг РФ

Пустовойт В.И. – НТЦ уникального приборостроения РАН

Рыжий В.И. – University of AIZU, Япония

Rogalski Antoni – WAT, Польша

Салаев Э.Ю. – Институт физики НАН, Азербайджан

Сигов А.С. – МИРЭА, Россия

Сизов Ф.Ф. – ИФП НАН, Украина

Солдатенков В.А. – ФГУП «Геофизика-НВ», Россия

Стафеев В.И. – ФГУП «НПО «Орион», Россия

Степанов Р.М. – ЦНИИ «Электрон», Россия

Тарасов А.П. – ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», Россия

Тарасов В.В. – ОАО «ЦНИИ «Диклон», Россия

Тaubкин И.И. – ФГУП «НПО «Орион», Россия

Яковлев Ю.П. – ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

Якушенков Ю.Г. – МИИГАиК, Россия

Организационный комитет

Председатель – Филачев А.М., ФГУП «НПО «Орион»

Заместитель председателя – Корнеева М.Д., ФГУП «НПО «Орион»

Заместитель председателя – Гринченко Л.Я., ФГУП «НПО «Орион»

Ответственный секретарь – Романишина М.И., ФГУП «НПО «Орион»

Члены комитета:

Ахменеев А.Д. – ГК «Ростехнологии»

Волков К.А. – ФГУП «НПО «Орион»

Глухова Е.В. – Минобрнауки РФ

Криволапова М.А. – Правительство г. Москвы

Куликов А.В. – Минпромторг РФ

Проскурин В.М. – ФГУП «НПО «Орион»

Ракович Н.С. – ОАО «НПК «ОСТ»

Токарев А.М. – ФГУП «НПО «Орион»

Общая информация

Время и место проведения

Конференция проводится 22-25 мая 2012 г. в ФГУП «НПО «Орион» по адресу: г. Москва, ул. Косинская, д. 9, корпус 2Г (вблизи станции метро «Выхино»).

Регистрация

Регистрация участников, выдача материалов конференции и отметка командировочных удостоверений проводятся 21 мая 2012 г. с 12.00 до 18.00 и 22 мая 2012 г. с 8.30.

Открытие конференции 22 мая 2012 г. в 10.00

Организационный взнос

Установлены следующие размеры организационного взноса, включающего оплату за участие в научной и социальной программе, издание тезисов и трудов конференции. Организационный взнос для зарубежных участников составляет 135 EUR, для участников из России и стран СНГ – 2000 руб., для докладчиков – 1200 руб., для студентов и аспирантов – 600 руб. Взнос может быть оплачен при регистрации.

Стендовые доклады вывешиваются с 12.30 до 20.00 в фойе 2-го этажа

Участникам школы по фотоэлектронике рекомендуется посещение всех пленарных докладов, устных и стендовых докладов по направлениям.

Труды конференции публикуются в авторской редакции.

Желающие опубликовать свои доклады в журнале «Прикладная физика» могут передать материалы для публикации в программный комитет во время проведения конференции или прислать их в срок до 1 августа 2012 г. в ФГУП «НПО «Орион».

Материалы для публикации должны быть оформлены в соответствии с правилами журнала «Прикладная физика» (см. стр. 343.)

Проезд на конференцию:

а) общественным транспортом:

Метро «Выхино»,

1-й вагон из центра, выход налево – на улицу Косинская, далее пешком по ул. Косинская до развилки с выездом на эстакаду, перейти пешеходный переход и идти вдоль выезда на эстакаду мимо металлического забора и автостоянки.

111538, Москва, ул. Косинская, дом 9

Тел. (499)-374-94-00, (499)-374-81-20, (499)-374-40-41



б) на автомобиле:

- 1) Проезд до ФГУП «НПО «Орион» - только по ул. Косинская.
- 2) После поворота с ул. Косинская разворот осуществлять строго по знакам - примерно 20 метров за постом ДПС.
(Разворот напротив поста ДПС запрещен)
- 3) Выезд - только через ул. Косинская (с правой полосы дороги)

П01 Состояние и перспективы развития твердотельной фотэлектроники в России

¹Филачев А.М., ^{1,2}Бурлаков И.Д.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

П02 Cooled infrared detectors comparison

David Billon-Lanfrey

SOFRADIR, France

The purpose of this presentation is to give a status of the performance of second generation cooled Infrared Detectors (IR), based on a comparison of the different detectors technology currently in production such as Mercury Cadmium Telluride (MCT), Indium Antimonide (InSb) and Gallium Arsenide (GaAs) Quantum Well Infrared Photodetectors (QWIP). This overview covers all the infrared detector figures of merits: Residual Fixed Pattern Noise (RFPN), number of defective pixels, calibration constraints, Focal Plane Array (FPA) temperature, Noise Equivalent Temperature Difference (NETD), Modulation Transfer Function (MTF) and spectral response. This presentation will also give an update of the Sofradir MCT 15µm pixel pitch detectors family. This technology, introduced on the market by Sofradir in 2004, is mature and produced in large quantities at our facility. Thanks to the small pixel size, these IR detectors have an improved MTF performance and are packaged in very compact dewars compatible with Size Weight And Power (SWAP) applications. The products family now covers midwave and longwave spectral bandwidth with format standard ranking from mid-television (384x288 pixels) to high definition (1280x1024 pixels).

П03 QWIP technology for LWIR applications at IRnova

(QWIP технология для дальнего инфракрасного диапазона в IRnova)

Sergiy Smuk, Henk Martijn, Carl Asplund

IRnova AB, Sweden

Введение

QWIP-технология нашла применение в области дальнего инфракрасного диапазона 8-12 мкм, где она может успешно конкурировать с КРТ-технологией за счет высокой однородности получаемого изображения, процента годных пикселей и цены. QWIP технология является ключевой для IRnova. Наряду с традиционными применениями продукции, основанной на QWIP технологии, таких как наблюдение и охрана границы, IRnova разработала продукты и материал для специальных применений. Примерами таких применений являются промышленный неразрушающий контроль, газовая детекция, космические применения как для наблюдения Земли, так и космоса.

QWIP-продукция IRnova

На настоящий момент IRnova предлагает матрицы и DDCA-модули различных форматов. Основной формат 640×480 с питчем 25 мкм на основе мультиплексора

Argus640 (IRnova640) имеет следующие типичные показатели: 32-34 мК NETD, 9-10 мК пространственный шум для F/2,7, рабочей температуры 68 К и температур калибровки 30 и 80°C. Для другого основного формата 320×256 с питчем 30 мкм на основе ISC9705 (IRnova320-ER) эти характеристики составляют 21-22 мК NETD, 6-7 мК пространственный шум при измерении с F/2,2, рабочей температурой 68 К и температурами калибровки 30 и 55°C. Для всех QWIP матриц IRnova типичное значение годных пикселей составляет 99,95%.

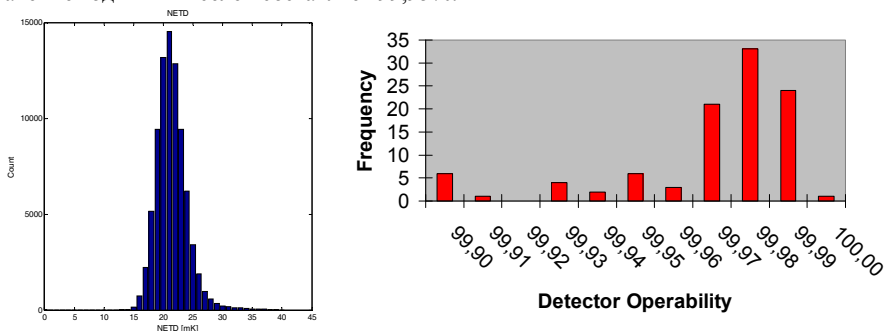


Рисунок 1. Характеристики IRnova320-ER

За счет улучшения структуры квантовых ям рабочая температура матриц была поднята от первоначальных 62-63 К до 70 и даже 72 К. Совершенствование технологического процесса привело к увеличению коэффициента использования полезной площади пикселя от 84 до 92%.

Новые разработки

Спрос на матрицы большого формата, такого как 1280×720, сопровождается одновременным требованием сохранения физических размеров матрицы для выполнения бюджета холодильника и требований оптики. Уменьшение размера пикселя сталкивается с фундаментальными трудностями - дифракционным пределом для длин волн дальнего ИК диапазона и количеством элементов дифракционной решетки. Для изучения влияния размера пикселя на светочувствительность было проведено моделирование методом конечных элементов, а затем – экспериментальное исследование.

В Таблице 1 представлены данные об экспериментальных образцах, а на рисунке 2 приведены результаты моделирования и измерений. Как и предсказывали результаты моделирования, чувствительность меньших пикселей снижается почти на 40% для размера 12 мкм.

Таблица 1. Размеры экспериментально исследованных структур

Питч детектора [μm]	Размер светочувствительного элемента, [μm]	Количество элементов дифр. решетки на пиксель
15	13,7	4×4
17	15,7	5×5
19	17,7	5×5
20	18,7	6×6
25	23,7	8×8
30	28	9×9

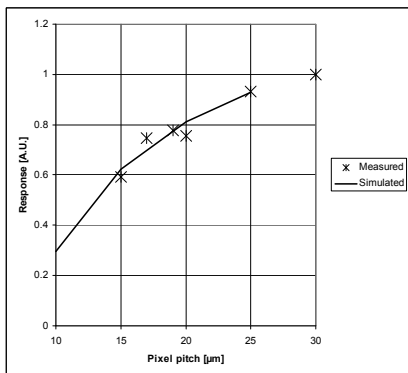


Рисунок 2. Результаты моделирования и экспериментальных измерений чувствительности QWIP-матрицы с разным размером светочувствительного элемента

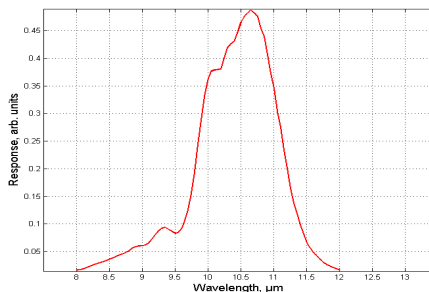


Рисунок 3. Спектр поглощения QWIP структуры для детекции SF6

Новый детектор был разработан для детекции утечек гексафторида серы (элегаза). Элегаз является одним из самых мощных парниковых газов, превывая эффект углекислого газа более чем в 22000 раз. Начиная с 2006 года его использование практически запрещено, кроме некоторых применений, а контроль за его расходом и утечками регулируется законодательно во многих странах. Пик поглощения элегаза приходится на 10,55 мкм. QWIP-детектор с пиком поглощения на этой же длине волны был создан на основе детектора IRnova320-ER. В связи с длиной волны и соответственно возросшим темновым током требуется заметно сильнее охлаждать этот детектор по сравнению с обычными. Детектор был установлен в охлаждаемый модуль, на котором была достигнута рабочая температура в 55 К и получено значение NETD в 35 мК. За счет использования специальной конструкции холодного пальца удалось снизить потребляемую мощность до 6-7 Вт в стационарном режиме.



Для разработки детекторов нового поколения с повышенной рабочей температурой, так называемых HOT-детекторов, IRnova избрала технологию T2SL – сверхрешетки второго типа. Прототип для 3-5 мкм на основе мультиплектора ISC9705 был аттестован в прошлом году, в настоящий момент ведутся эксперименты с прототипом 640×512 с питчем 15 мкм на основе мультиплектора ISC0403. К концу 2012 года будет создан прототип DDCA. Ожидаемые показатели NETD 20 мК, пространственный шум 10 мК при F/4, рабочая температура 120 К, 99,5% годных пикселей, кадровая частота 60 Гц, вес DDCA менее 400 г. T2SL структуры для диапазона 8-12 мкм также находятся в стадии разработки.

П04 Возможности кластерных комплексов для создания и исследования приборов микро- и нанoeлектроники

^{1,2} Быков В.А.

¹ *Научно-производственная группа предприятий «НТ-МДТ», Зеленоград, Россия*
² *ФГУП «НИИ физических проблем им. Ф.В. Лукина, Зеленоград, Россия*

Начиная с уровня 130 нм, развитие микроэлектроники потребовало создания кластерных комплексов и в настоящее время именно такие комплексы используются в стандартных технологических линиях.

Отличительной особенностью нанотехнологических модулей НТ-МДТ является то, что они предназначены не только для исследования технологических процессов, но и для создания нанотехнологических функциональных элементов. В ходе их создания была решена задача прецизионного репозиционирования. Разработаны специальные двухкоординатные системы, оснащенные высокоточными датчиками линейного перемещения, позволяющие с точностью до нескольких десятков нанометров быстро находить заданный участок поверхности пластины при переносе образца из одного модуля в другой. Кроме того, конструкция держателя пластины и позиционера обеспечивают возможность репозиционирования образца исходно с точностью 2-3 мкм, что существенно меньше площади сканирования.

В зависимости от конкретного типа изделий, на разработку которых ориентируется комплекс, требования к точности реализации тех или иных элементов, квазипланарных или 3-х мерных функциональных структур могут составлять от десятков нанометров до долей нанометра с атомарным дискретом. Модули комплексов НАНОФАБ-100, -25 можно разделить на два типа – модули формирования пленочных структур (напыление, молекулярно-лучевая эпитаксия, лазерная абляция, химическое осаждение из газовой фазы, модуль атомно-слоевого осаждения, модули плазменных технологий, химической модификации и т.п.), для которых прецизионное позиционирование в плоскости не требуется и необходим интегральный контроль процессов и контроль качества пленочных структур – модули «групповых» технологий, и модули, требующие взаимосовмещения, обеспечивающие возможность быстрого репозиционирования с возможностью обращения к тому или иному элементу или участку поверхности – модули «локальных» технологий (модули сканирующей зондовой микроскопии и литографии, электронной микроскопии и литографии, модули с использованием фокусированных ионных пучков, модули для измерения свойств и характеристик элементов, модули рентгеновской микроскопии, модули проекционного иницированного роста и т.п.).

В особенности интересна многолучевая электронная литография, позволяющая реализовать до 5 экспозиций в час на пластинах диаметром 300 мм, что придает комплексам новое качество, превращая их из чисто исследовательских в промышленные.

Транспортная система комплексов базируется на шестипозиционных сверхвысоковакуумных радиальных модулях со встроенными манипуляторами, обеспечивающими захват и перемещение образца из модуля в модуль. В модули встроены системы для вращения и линейного перемещения образцов, обеспечивающие точность репозиционирования образца, закрепленного на специализированном держателе – носителе с точностью до 10 мкм при выносе 1280 мм у НАНОФАБ 100 и 780 мм у НАНОФАБ 25.

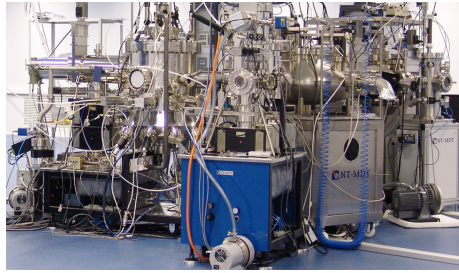


Рис. 1 Фотография комплекса Нанофаб 100 в ФГУП НИИФП им. Ф.В.Лукина

П05 Новая система сборки для мегапиксельных ИК ФПУ

¹Guenael Ribette, ²Ефимов В.М.

¹SET S.A.S. (Smart Equipment Technology), France

²Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

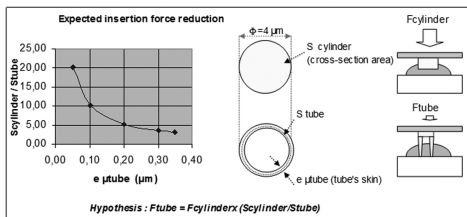
Введение. Для того чтобы увеличить формат ИК фотоприемных устройств (ФПУ), необходимо уменьшить размер пикселя, но при этом к применению Flip-Chip (F/C) процесса гибридации предъявляются новые повышенные требования. Система лазерного выравнивания корректна до значений 20 мкрад. Для мегапиксельных ИК ФПУ требуется более высокая точность. Для того чтобы решить проблему непланарности, разницы термического расширения (подложек), снижения усилия термокомпрессии и температуры гибридации фирмой LETI, в Гренобле была разработана новая технология гибридации при комнатной температуре на установке SET FC300.

Использованный ранее процесс с переплавкой микроконтактов, по мере увеличения чипа, делает всё более затруднительным совмещение кристаллов по причине слишком большой разницы термического расширения материалов. Ввиду малости микроконтактов и изгиба кристаллов становится неприменимой и технология самосовмещения. Применение технологии термокомпрессии также становится затруднительным из-за резкого возрастания (до 3-х тонн, для больших аэрокосмических матриц) усилия сжатия, а также необходимости удаления естественного окисла с поверхности индия.

СЕА-LETI предложила новую технологию сборки при комнатной температуре при которой в мягкие микроконтакты на первом кристалле втыкаются микротрубки, сформированные на другом

кристалле. Процесс идет при пониженной температуре (комнатной) и пониженном давлении [1-3].

Понижение давления достигается тем, что стенки микротрубок формируются очень тонкими. Так, при диаметре микротрубок 4 мкм и толщине стенок 0,1 мкм давление вдавливания уменьшается на порядок. При этом при шаге матрицы менее 10 мкм, возможно соединение ФПУ размерностью 2000x2000 и более.



В докладе будет кратко представлена патентованная технология формирования микротрубок, основанная на нанесении рельефного слоя металла и процессе планаризации углублений (“gap fill” processes). Полученные преимущества новой технологии заключаются также в том, что острые края стенок микротрубок решают проблему разрушения окисной пленки и не требуется удаления флюса. Кроме того гибридная при комнатной температуре позволяет избежать разбега пикселей вызванного разностью КТР.

Для мегапиксельных матриц проблема выравнивания кристаллов при сборке не решается до конца даже с использованием лазерного выравнивания [4]. При высоте микротрубок ~2,6 мкм эта проблема становится критической. Будет описано устройство механического автовыравнивания, которое позволяет решить эту проблему. Кратко будет представлен принцип работы, описание отдельных функций и точность отдельных операций новейшей модификации Flip-Chip установки FC300, с помощью которой была реализована вышеописанная технология.

Заключение. В настоящее время сборка ИК ФПУ с шагом до 5 мкм легко осуществима с использованием сборочной машины SET FC300 с улучшенной системой самовыравнивания и применением для соединения технологии микротрубок. Сборочная машина SET FC300 с подобной системой в настоящее время уже работает на многих производствах изготовления ИК ФПУ.

Литература:

[1]: C. Davoine, M. Fendler, F. Marion, “Low temperature F/C technology for fine pitch bonding”, Proc of ECTC San Diego, 2006, p 24-28

[2]: C. Davoine, "Densification des connexions “flip-chip,” grande surface”, M.S. thesis, CEA-LETI, MINATEC, Grenoble, France, 2006.

[3]: G.Humpston, D. Jacobson Principles of soldering pp 199-203 Ed ASM International The material Information Society

[4]: Новейшие средства гибридной интеграции охлаждаемых инфракрасных фотодетекторов,

G. Ribette, G. Lecarpentier, Ефимов В. М. et al., данная конференция.

П06 Двухспектральные фотоприемные устройства на основе HgCdTe

Михайлов Н.Н., Брунев Д.В., Васильев В.В., Варавин В.С., Дворецкий С.А.,
Икусов Д.Г., Предеин А.В., Ремесник В.Г., Сабина И.В., Сидоров Г.Ю.,
Сидоров Ю.Г., Сусяков А.О., Асеев А.Л.

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

Разработана технология и изготовлены охлаждаемые двухспектральные фотоприемные устройства (ДФПУ) формата 2×288×4 элементов на основе гетероэпитаксиальных наноструктур (ГЭНС) теллурида кадмия и ртути (КРТ), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

В первом ДФПУ используются два односпектральных инфракрасных (ИК) фотоприемника (ФП) формата 288×4 элементов с чувствительностью в спектральных диапазонах 3-5 мкм и 8-11 мкм смонтированы в вакуумный криостатируемый корпус, сопряженный с микрокриогенной системой охлаждения. Во втором ДФПУ используются два двухспектральных ИК ФП формата 288×4 элементов каждый с чувствительностью в спектральных диапазонах 3-5 мкм и 8-11 мкм. ИК ФП смонтированы в вакуумный криостатируемый корпус, интегрированный с микрокриогенной системой охлаждения.

Для двухспектральных ИК ФП разработана технология, определен дизайн и проведено выращивание двухслойных ГЭНС КРТ МЛЭ на подложках (013)CdTe/ZnTe/GaAs с молярным содержанием теллурида кадмия $X_{\text{CdTe}} \approx 0,3$ и $X_{\text{CdTe}} \approx 0,22$ в фоточувствительных слоях, разделенных широкозонным барьерным слоем. Контроль состава и толщины слоев двухслойных ГЭНС КРТ МЛЭ *in-situ* проводился с помощью измерений эллипсометрических параметров. Состав фоточувствительных слоев двухслойных ГЭНС КРТ МЛЭ *ex-situ* определялся из анализа спектров поглощения, полученных из спектров пропускания с использованием данных эллипсометрических измерений. Данный метод дает хорошее соответствие состава слоев двухслойной ГЭНС КРТ МЛЭ определенных из эллипсометрических измерений и полученных из спектров отражения при послойном травлении.

После выращивания ГЭНС КРТ МЛЭ имеют электронный тип проводимости. Термический отжиг в инертной среде позволяет получить ГЭНС КРТ МЛЭ дырочного типа проводимости концентрацией дырок $p_{77\text{K}} = 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $p_{77\text{K}} = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в широкозонном и узкозонном слоях соответственно. Технология изготовления двухспектральных ИК ФП включает гибридную сборку фоточувствительных элементов, полученных ионной имплантацией бором, с кремниевым мультиплексором на основе индиевых столбов разной высоты (рис. 1).

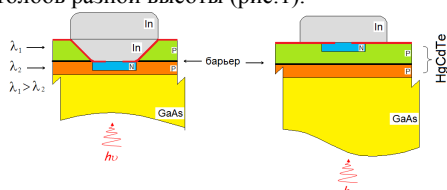


Рис.1 Схема фотодиодов на основе двухслойных ГЭНС МЛЭ КРТ: слева – для спектрального диапазона 3-5 мкм; справа - для спектрального диапазона 8-11 мкм.

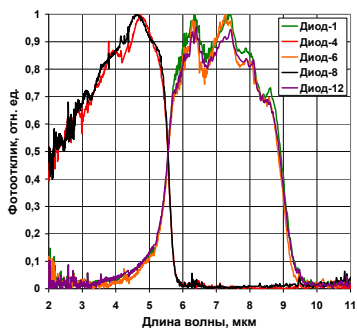


Рис.2 Спектральные характеристики

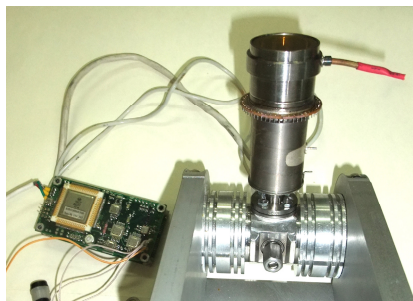


Рис.3 Фотография ДФПУ

На рис. 2 показана спектральная зависимость двухспектрального ИК ФП на основе двухслойных ГЭНС КРТ МЛЭ с $\lambda_{0,5} = 5,6$ мкм (3-5 мкм) и $\lambda_{0,5} = 8,9$ мкм.

Фотоэлектрические параметры ДФПУ ограничены фоновым излучением. Среднее значение удельной обнаружительной способности в максимуме спектральной чувствительности в спектральном диапазоне 3-5 мкм не менее $5,57 \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$, для диапазона 8-11 мкм - не менее $2,06 \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$. Среднее значение вольтовой чувствительности каналов в максимуме спектральной чувствительности в спектральном диапазоне 3-5 мкм – $5,77 \cdot 10^9 \text{ В/Вт}$, 8-12 мкм - $6,68 \cdot 10^8 \text{ В/Вт}$; с дисперсией

вольтовой чувствительности не более 2,7% и 4,3% соответственно и количеством годных каналов в обоих случаях – 100%.

На рисунке 3 показана фотография ДФПУ.

П07 Фоточувствительные модули на основе ПЗС в ОАО «ЦНИИ «Электрон»

Алымов О.В., Степанов Р.М., Левко Г.В., Арутюнов В.А., Айнбунд М.Р.

«ОАО ЦНИИ «Электрон», Санкт-Петербург, Россия

Расширение применения ФПУ на основе ПЗС связано с повышением чувствительности и расширением спектрального диапазона. В обычных матричных ФПЗС при освещении с фронтальной стороны толщина поликремниевых электродов составляет, примерно 0,5 мкм, обеспечивая достаточно высокую проводимость. С другой стороны толстые электроды обладают достаточно высоким поглощением, особенно в коротковолновой его части. Режим работы матрицы с освещением с обратной, тыльной стороны устраняет эти недостатки.

Большая часть света видимого диапазона поглощается в слое кремния толщиной в несколько микрометров, поэтому при освещении с обратной стороны толщина слоя кремния уменьшается до 8–10 мкм.

Высокочувствительные модули на основе утоньшенных матриц, работающие в режиме электронного возбуждения обладают высокой чувствительностью и улучшенным отношением сигнал-шум по сравнению с ЭОПом. В приборе с электронным возбуждением отсутствует инерционность, связанная с послесвечением экрана ЭОП и обеспечивает высокое быстродействие. Прибор обладает повышенной радиационной стойкостью, т.к. в нем отсутствует стекловолоконно.

В ОАО «ЦНИИ «Электрон» ведутся работы по созданию такого прибора на основе матрицы с числом элементов 768x580 с размером чувствительного элемента 17x34 мкм, и размером изображения на фотокатоде 13,1x9,8 мм. Получено усиление в матрице 800-1000 раз при ускоряющем напряжении 6-6,5 кВ.

Пороговая чувствительность составляет $5 \cdot 10^{-5}$ лк, а рабочая освещенность на фотокатоде $5 \cdot 10^{-4}$ лк с отношением сигнал-шум не менее 30.

Существенное улучшение характеристик возможно за счет перехода в область ближнего ИК-диапазона 1-1,6 мкм. Создание фотокатодов для этого диапазона обеспечивается путем использования явления усиления фотоэмиссии структур

InP-InGaAs электрическим полем. Обычно это явление возникает при приложении к поверхности фотокатода положительного напряжения смещения, вследствие чего электроны преодолевают внутренние энергетические барьеры и выходят в вакуум. Обычно такие катоды называют, как Field Assisted (FA) или Transferred Electron (TE) (фотокатоды с тянущим электрическим полем или фотокатоды с переносом электронов).

На образце структуры InP-InGaAs, выращенной на подложке *p*-InP нами получены квантовые выходы 5,2% на длине волны 1,06 мкм и 3,5% на длине волны 1,54 мкм. Результаты исследований показывают на возможность достижения квантового выхода 10% и более.

Наиболее перспективными для УФ области спектра являются фотокатоды с отрицательным электронным сродством на основе эпитаксиальных структур AlGaN. Изменяя состав твердого раствора $Al_xGa_{1-x}N$, получили материал с длинноволновой границей чувствительности от 360 нм ($x=0$) до 200 нм ($x=1$). На структурах $Al_{0,3}Ga_{0,7}N$ нами в сотрудничестве с ЗАО «Научное и технологическое оборудование» и ФТИ

им. А.Ф.Иоффе РАН удалось получить солнечно-слепые фотокатоды с «красной» границей чувствительности 300 нм, что необходимо для хорошего солнечно-слепого фотокатода.

Представлены технические параметры и результаты исследований точностных характеристик цифрового модуля ФПУ на основе ФППЗ-8ЛБ. Билинейный модуль ФППЗ-8ЛБ с числом элементов 2×1000 содержит две параллельных идентичных по геометрическим параметрам ряда фоточувствительных элементов, смещенных относительно друг друга на половину шага элемента для повышения общей разрешающей способности. Цифровой модуль допускает перепрограммирование тактовой диаграммы управления ЛФППЗ для реализации других режимов работы прибора.

Использование цифрового модуля для координатных измерений по протяженной световой марке позволило получить точность определения положения центра тяжести световой марки не хуже 0,2 мкм по всей длине фоточувствительной области прибора (13 мм) и линейность измерения положения светового штриха (марки) -0,02%. Таким образом, общее число координатных отсчетов равно $6,5 \cdot 10^4$.

Для устройств ориентации космических аппаратов по Солнцу разработан модуль ФПУ на основе ЛФППЗ с числом элементов 2600×2 размером 12×100 мкм и шагом расположения 12 мкм с повышенной радиационной стойкостью. Модуль содержит два независимых прибора, имеющих осевую симметрию и независимое управление, что обеспечивает резервирование измерительной системы. Приборы имеют динамический диапазон не менее 6000 и содержат встроенные системы антиблужинга с кратностью пересветки порядка 1000 и электронного экспонирования от 10 мкс и более.

П08 Матричные инфракрасные фотоэлектронные модули НПО «Орион»

¹Филачев А.М., ^{1,3}Бурлаков И.Д., ^{1,2}Пономаренко В.П., ¹Еремчук А.И., ^{1,2}Болтарь К.О.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

³ МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

П09 Фотоприемный модуль формата 640×512 на основе гетероструктур CdHgTe/Si(310), выращенных методом МЛЭ

Якушев М.В., Брунев Д.В., Васильев В.В., Варавин В.С., Дворецкий С.А.,
Сабина И.В., Сидоров Ю.Г., Сорочкин А.В., Марчишин И.В., Асеев А.Л.

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

Узкозонные полупроводниковые твердые растворы теллурида кадмия и ртути (КРТ) занимают лидирующее место для производства инфракрасных (ИК) фотоприемников (ФП).

Нами проведены всесторонние исследования процессов роста методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) $Cd_xHg_{1-x}Te$ на подложках Si(310) для полноформатных ИК ФП. Разработаны ИК ФП формата 640×512 для спектрального диапазона 3-5 мкм.

Выращены ГЭС КРТ МЛЭ на подложках из кремния диаметром 76,2 мм. Максимальное отклонение состава ГЭС КРТ МЛЭ на диаметре 76,2 мм составляет

менее 0,002 мол.дол., что при 77 К для слоев с составами $X_{\text{CdTe}} \sim 0,3$ мол. дол. соответствует разбросу в длинноволновой границе $\Delta\lambda_{1/2} = 0,1$ мкм.

Из гетероструктур КРТ p -типа с составом $x = 0,29 - 0,33$ с помощью ионной имплантации бора были изготовлены матричные фоточувствительные элементы формата 640×512 с шагом 25 мкм для спектрального диапазона 3–5 мкм и измерены их вольтамперные характеристики (ВАХ). Из измеренных ВАХ были рассчитаны произведение дифференциального сопротивления при нулевом смещении R_0 на его оптическую площадь A . Значение $R_0 A$ для измеренных диодов составило величину порядка 10^5 Ом·см².

Разработан матричный мультиплексор формата 640×512 . Мультиплексор обеспечивает работу с любым из трех форматов 640×512 , 640×480 , 512×512 фотоприемной матрицы; работу в режиме «окна» произвольного размера с произвольным расположением в матрице; режим «мгновенной фотографии» (snap shot); считывание информации в двух режимах - режим «интегрирование, затем считывание» (ITR) и режим «интегрирование во время считывания» (IWR). Мультиплексор позволяет управлять временем накопления и кадровой частотой с помощью внешнего сигнала, управлять режимами работы с помощью последовательного и параллельного интерфейсов.

Основные электрические параметры мультиплексора:

- | | |
|--|---------|
| - смещение на ФД относительно базового контакта положительное, регулируемое в пределах, мВ | 10-1200 |
| - максимальная зарядовая емкость, не менее, пКл | 2.0 |
| - размах выходного напряжения, не менее, В | 2.5 |
| - количество сигнальных выходов | 4 |
| - динамический диапазон (при соотношении сигнал/шум ≥ 1), не менее, дБ | 80 |
| - номинальная частота вывода информации, МГц | 5 |
| - максимальная частота вывода информации, МГц | 10 |
| - напряжение питания, В | 5 |
| - потребляемая мощность, не более мВт | 150 |

Изготовлены гибридные матричные ИК ФП формата 640×512 для спектрального диапазона 3–5 мкм ($\lambda_{1/2}$ (77 К) = 4,2 мкм) и измерены их характеристики. При измерениях температура образца, фона и абсолютно черного тела (АЧТ) составляли 78, 293 и 501 К соответственно. Измерения проводились в апертурном угле 56° , частота опроса выходного сигнала составляла 2.0 МГц и время накопления, 640 мкс. Количество дефектных элементов в матрицах составило менее 3 %. Средние значения вольтовой чувствительности и разности температур эквивалентной шуму (NETD) были более $1,5 \cdot 10^9$ В/Вт и менее 20 мК соответственно. Тепловое изображение, полученное с помощью макета тепловизионного канала на основе ФПУ формата 640×512 , визуально наблюдается в реальном масштабе времени, на изображении наблюдается характерное распределение температуры на лице человека (Рис.1.).

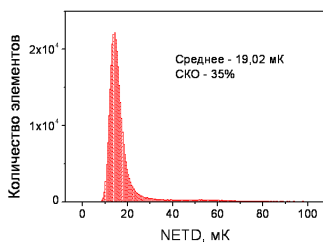


Рис. 1. Гистограмма разности температур эквивалентной шуму фотоприемника 640×512 элементов и пример теплового изображения, полученного с его помощью в составе макета тепловизионного канала.

П10 Современное состояние с микрокриогенными системами охлаждения для ИК фотоэлектроники

Веприк А.

Ricor, Израиль

П11 Конвертер терагерцового излучения в инфракрасное на основе метаматериалов для детекторов терагерцового диапазона

¹Паулиш А.Г., ²Кузнецов С.А., ²Лоншаков Е.А., ²Аржанников А.В., ²Тумм М.К.А.,
¹Вергилес С.А., ¹Гельфанд А.В., ¹Лазорский П.А., ¹Новгородов Н.Б., ¹Турбин А.В.,
¹Хрящев С.В., ¹Федоринин В.Н.

¹ *Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский государственный университет, Россия*

Интерес к терагерцовой области частот электромагнитного излучения обусловлен бурным развитием источников данного излучения. В мире ведется активный поиск задач, которые могут решаться с помощью этого излучения. Терагерцового излучение привлекательно тем, что свободно проходит через непроводящие среды, такие как различного рода пластики, текстильные ткани, мелкодисперсные среды – туман, пыль, облака. С другой стороны, это излучение активно взаимодействует с проводящими материалами, биологическими и химическими объектами. Такие свойства позволяют создать системы детектирования скрытых объектов и веществ, в том числе опасных, системы дистанционного, не контактного, химического и биологического анализа различных веществ.

Наибольший интерес представляют неохлаждаемые матричные приемники терагерцового излучения, способные получать изображения в режиме реального времени. Примером неохлаждаемых приемников являются болометрические приемники. Однако в природе не существует материала, обладающего коэффициентом поглощения близким к единице для длины волны излучения порядка миллиметра при микронных толщинах поглотителя. Микронные толщины необходимы для обеспечения высокой чувствительности и высокого быстродействия болометра. Подходящим решением является использование ультратонких резонансных поглотителей на основе

метаматериалов [1]. Поглотитель представляет собой тонкую (много меньше рабочей длины волны) металлизированную с двух сторон диэлектрическую пленку. С одной стороны плёнки методом контактной фотолитографии сформирован геометрический рисунок, представляющий собой частотно-избирательную поверхность [2], обеспечивающую близкое к единице поглощение на заданной длине волны.

На основе таких метаматериалов разработан конвертер терагерцового (ТГц) излучения в инфракрасное (ИК) и визуализатор ТГц излучения [3]. ТГц-ИК конвертер представляет собой многослойную структуру, состоящую из резонансного ультратонкого поглотителя на основе метаматериалов, на обратную сторону которого нанесен тонкий эмиссионный слой с коэффициентом черноты близким к 1. Поглощение ТГц-излучения приводит к нагреву поглотителя и увеличению ИК излучения со стороны эмиссионного слоя, которое регистрируется высокочувствительной ИК камерой.

Существенным преимуществом такого схмотехнического решения является то, что детектор не имеет ограничений на общий размер матрицы, так как считывание информации с матрицы происходит оптическим методом. Это существенно для визуализации излучения с длиной волны порядка одного миллиметра, где общий размер преобразователя должен быть достаточно большим (много больше рабочей длины волны). Например, для излучения с длиной волны 1 мм, сочетающим достаточно высокую проникающую способность и приемлемое пространственное разрешение, размер матрицы должен составлять более 50 мм.

На рисунке 1 показана схема конвертера и спектральные характеристики поглотителя. В качестве диэлектрика использовалась плёнка полипропилена толщиной 20 микрон, толщина алюминиевой металлизации 0.4 микрона, толщина эмиссионного слоя около 10 микрон. Термодинамические расчёты показали, что эффективность преобразования ТГц излучения в ИК составляет более 30% и эта величина может быть увеличена дальнейшим снижением толщины поглотителя и эмиссионного слоя. На рисунке 2 показано тепловое изображение эмиссионного слоя конвертера, полученного с помощью ИК камеры. На конвертер наложена крестообразная мира размером 15×3 мм, со стороны ЧИП конвертер освещен ТГц излучением частотой 0,20 ТГц, имеющим гауссово распределение с шириной на полувысоте около 16 мм. На рисунке 3 показаны стоп кадры фильма, записанного с частотой кадров 25 кадров/секунду, при движении ТГц пучка по поверхности конвертера.

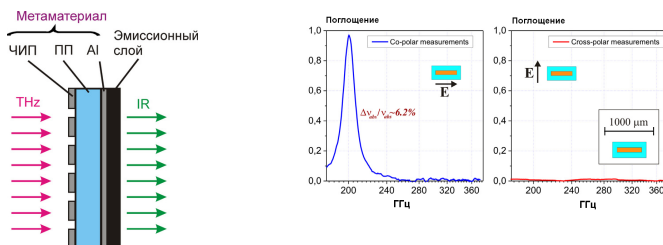


Рисунок 1. Схема ТГц-ИК конвертера (слева), ЧИП – частотно избирательная поверхность, ПП – полипропилен, Al – алюминий; Спектральная характеристика поглотителя (справа).

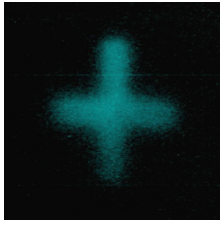


Рисунок 2. Изображение крестообразной миры длиной 15 мм и шириной 3 мм при освещении излучением с длиной волны 1.5 мм (0.2 ТГц).

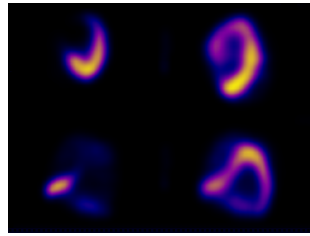


Рисунок 3. Стоп кадры фильма при свободном движении сфокусированного ТГц пучка по поверхности конвертера.

Литература:

- [1] X. Liu, T. Starr, A. F. Starr, and W. J. Padilla, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 207403 (2010).
 [2] B. A. Munk, “Frequency Selective Surfaces: Theory and Design”, John Wiley&Sons Inc, 2000.
 [3] Преобразователь терагерцового излучения (варианты). Заявка на патент РФ №2010146644 от 16.11.2010, решение о выдаче патента от 24.10.2011.

П12 Мощные светодиоды в средней ИК области спектра (1,6 – 4,6 мкм) на основе узкозонных соединений $A^{III}B^V$

¹Яковлев Ю.П., ¹Шерстнев В.В., ²Журганов Б.Е., ¹Гребенщикова Е.А.,
²Старостенко Д.А., ²Золотухин А.В., ¹Кижаяв С.С., ¹Иванов Э.В., ¹Ильинская Н.Д., ¹Серебренникова О.Ю.

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
² ООО «АИБИ», Санкт-Петербург, Россия

Разработаны высокоэффективные светодиодные наногетероструктуры в системе GaSb-InAs, перекрывающие полностью средний ИК-диапазон спектра (1,6-4,6 мкм). Исследованы оптические и электрические характеристики структур в широком температурном интервале (-30 ÷ +50°C). Созданы конструкции миниатюрных светодиодных излучателей со встроенным термохолодильником и термосенсором, а также многоцветных светодиодных линеек и матриц.

Светодиодные наногетероструктуры для спектрального диапазона 1,6-2,5 мкм выращивались на подложках GaSb. В качестве активной области использовали четверной твердый раствор InGaAsSb для светодиодов излучающих на длине волны 1,6-2,5 мкм. Для обеспечения необходимого электронного ограничения с двух сторон активной области использовали широкозонные четверные твердые растворы GaAlAsSb, изопериодные подложке GaSb. В основе создания светодиодов для спектрального диапазона 1,6-2,5 мкм лежит технология эпитаксии изопериодных многослойных наногетероструктур. Четверной твердый раствор InGaAsSb, образует согласованные по периоду решетки пары для целого ряда составов с подложкой GaSb. Эти материалы являются прямозонными полупроводниками для всей области составов и позволяют создавать как ступенчатые, так и разъединенные гетеропереходы II типа в зависимости от состава [1]. Диапазон изменения ширины запрещенной зоны с изменением состава InGaAsSb соответствует диапазону длин волн 1,7÷4,8 мкм. Было установлено, что гетеропереход GaSb/GaInAsSb является ступенчатым для составов

близких к GaSb и разьединённым для составов близких к InAs ($x>0,79$). В качестве активного слоя для светодиодов с длинами волн больше 1,8 мкм были использованы четверные твердые растворы GaInAsSb с содержанием индия от 5 до 22%. Для создания светодиодов с длиной волны 1,75 мкм в качестве активного слоя использовали бинарное соединение GaSb, а для $\lambda=1,65$ мкм - четверной твердый раствор AlGaAsSb с 3% содержанием алюминия. В качестве ограничительных слоев использовались четверные твердые растворы AlGaAsSb с содержанием алюминия 34% ($E_g=1,1$ эВ) и 64% ($E_g=1,3$ эВ) [2].

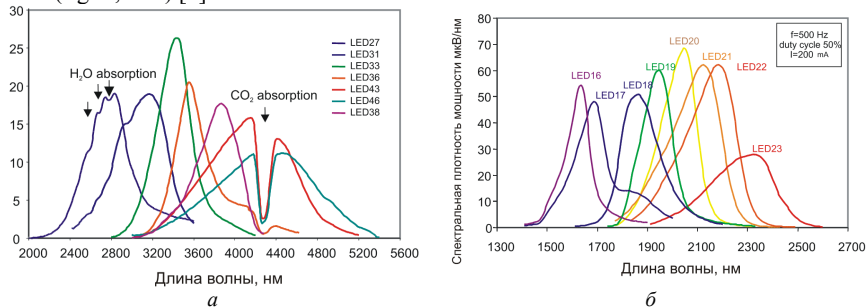


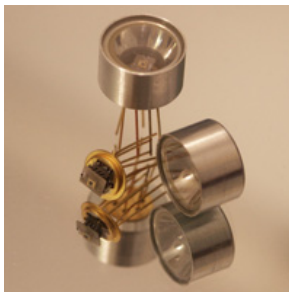
Рис. 1. Спектры разработанных светодиодов для спектрального диапазона 1,6-2,3 мкм (а) и 2,7-4,6 мкм (б)

Светодиодные наногетероструктуры для спектрального диапазона 2,7-5,0 мкм выращивались на подложках InAs. В качестве активной области использовали бинарное соединение InAs для светодиодов излучающих на длине волны $\lambda=3,3$ мкм, четверной твердый раствор $InAs_{0,63}Sb_{0,12}P_{0,25}$ для $2,7<\lambda<3,4$ мкм и тройной твердый раствор $InAs_{0,97}Sb_{0,03}$ для $2,9<\lambda<3,7$ мкм. Для обеспечения необходимого электронного ограничения с двух сторон активной области использовали широкозонные четверные твердые растворы InAsSbP, изопериодные к подложке InAs с содержанием фосфора 50% ($InAs_{0,16}Sb_{0,28}P_{0,56}$) [3].

Структуры выращивались методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD) в реакторе горизонтального типа. Разработана постростовая технология обработки светодиодных пластин. С помощью фотолитографии формируются кольцевые контакты и разделительная сетка светодиодных чипов. Проведена серия экспериментов для определения оптимальных контактных систем к n и p материалу и оптимальные режимы вжигания контактов. Для точного определения концентрации измеряемых веществ в оптических сенсорах необходимо стабилизировать температуру излучателя. Для этой цели была разработана оригинальная конструкция 9 мм корпуса TO₃₉ с встроенным миниатюрным термохолодильником и терморезистором, позволяющая изменять и контролировать температуру светодиодного чипа (рис.2).



а



б

Рис. 2. Фотографии светодиодов в корпусе со встроенным термоохладителем и терморезистором с крышкой (а) и параболическим рефлектором (б)

Были достигнуты значения мощности излучения для светодиодов диапазона 1,6-2,2 мкм до 2 мВт в квазинепрерывном режиме (CW), и до 100 мВт в режиме коротких импульсов ($\tau=500$ нс).

Разработанные светодиоды превосходят тепловые источники ИК излучения по всем основным параметрам:

- быстродействие на 3 порядка выше, чем у тепловых источников ($\sim 0,1$ с).
- существенно более низкая потребляемая электрическая мощность.
- время жизни 80000-100000 часов при непрерывной работе (более чем на порядок превышает время жизни тепловых источников).
- малый размер светодиодных чипов (0,3x0,3 мм) позволяет создавать исключительно компактные излучатели.

Литература

[1] Mikhailova M.P. and Titkov A.N. "Type II heterojunctions in the GaInAsSb/GaSb system" // Semicond.Sci.Technol. 1994, Vol.9, pp.1279-1295

[2] Стоянов Н.Д., Журтанов Б.Е., Астахова А.П., Именков А.Н. и Яковлев Ю.П. // ФТП, 2003, том 37, вып.8 стр.996-1009.

[3] Е.А. Гребенщикова, А.Н. Именков, С.С. Кижаяев, А.С. Головин, Ю.П. Яковлев.//Исследование эффективности вывода излучения из меза-светодиодов на основе узкозонной активной области InAsSb// ФТП, 2012, том 46, вып. 2, с. 247- 251.

У01 Новейшие средства гибридации охлаждаемых инфракрасных фотодетекторов

¹G. Ribette, ¹G. Lecarpentier, ²Ефимов В. М., ²Сидоров Г.Ю., ²Курышев Г.Л.,
²Сидоров Ю.Г.

¹SET S.A.S. (Smart Equipment Technology), France

²Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

По мере развития технологии охлаждаемых матричных фотоприемных устройств (ФПУ), в частности по мере увеличения их размерности до мегапиксельных значений, резко возрастают требования к важнейшей технической операции – гибридации таких ФПУ. Безусловным европейским лидером по созданию технических средств гибридации методом «перевернутого кристалла» (Flip-Chip technology) является институт Smart Equipment Technology (SET), являющейся бывшим

подразделением ответственным за технологию средств гибридации фирмы SUSS MicroTec. В докладе будут представлены технические разработки института SET, позволившие перейти на качественно новый уровень в Flip-Chip технологии. Найденные решения позволяют реализовать надежное соединение до 10^7 микроконтактов кремниевого коммутатора со встречными микроконтактами матричного ФПУ. В докладе будут показаны технические решения двух наиболее серьезных проблем, возникающих в процессе гибридации. Первая проблема связана с установкой параллельности соединяемых кристаллов в случае, когда используются недостаточно плоские кристаллы, имеющие слабое отражение от поверхности. Для таких образцов классическая схема выравнивания, использующая автоколлиматор дает неудовлетворительные результаты. Система лазерного выравнивания, разработанная компанией SET, позволяет достигать высокой параллельности соединяемых кристаллов (с точностью до 1 микрона), и позволяет обойти ограничения схемы выравнивания, использующей автоколлиматор. Принципиальная схема лазерной системы показана на рисунке. Процедура выравнивания заключается в последовательном измерении расстояний между соединяемыми подложками в нескольких заданных точках. После этого верхний кристалл наклоняется таким образом, чтобы расстояния между заданными точками стали равны. При необходимости процедура повторяется.

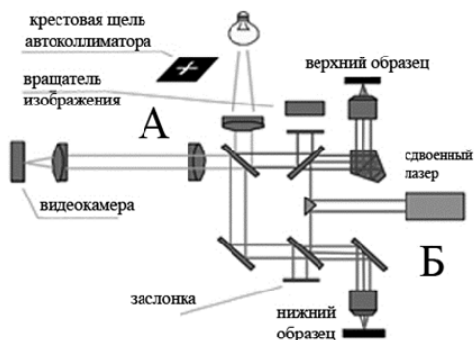


Рис. 1. Оптическая схема выравнивания образцов с использованием автоколлимации (А) и системы лазерного выравнивания (Б).

Вторая проблема, решение которой обсуждается в докладе, связана с необходимостью удаления естественного окисла с поверхности индиевых микроконтактов непосредственно в Flip-Chip процессе. Эта проблема успешно решена в SET использованием паров муравьиной кислоты для стравливания окисной пленки непосредственно во Flip-Chip процессе. Обсуждаемые опции реализованы в промышленных установках FC-150 и FC-300 и позволяют осуществить соединение сверхмалых микроконтактов, размером до 7 мкм.

Реальная применимость найденных технических решений иллюстрируется экспериментами по гибридации матричных ФПУ, разработанных в ИФП СО РАН. Для экспериментов использовались тестовые структуры на основе InAs размерностью 130×130 элементов и реальные ФПУ на основе эпитаксиальных пленок HgCdTe на подложках GaAs [1]. Эксперименты проводились на установке FC-150, с использованием лазерной системы выравнивания. Гибридация осуществлялась с усилием 2 кг, при котором не происходит существенной деформации индиевых микроконтактов. Количество рабочих контактов в полученных при таких условиях

сборках позволяет судить о качестве выравнивания перед сборкой. Использование лазерной системы позволило получить около 100% рабочих контактов, в то время как на таких же тестовых структурах, собранных с использованием схемы с автоколлиматором на аналогичных машинах FC6 и M9 удавалось получать только около 30% и 60% работающих контактов соответственно.

В докладе будут представлены технологические пути решения некоторых проблем соединения индиевых микроконтактов матричных ФПУ, например, с использованием тонкопленочной эвтектики Sn+In, для избежания от окисного индиевого слоя [2]. Показана возможность применения специфической зависимости эффективной пластичности индиевых элементов от их геометрических параметров для формирования опорных элементов.

Литература

[1] *320×256 HgCdTe IR FPA with a built-in shortwave cut-off filter*, V.V. Vasilyev, V.S. Varavin, S.A. Dvoretzky, I.V. Marchishin, N.N. Mikhailov, A.V. Predein, V.G. Remesnik, I.V. Sabina, Yu.G. Sidorov, and A.O. Susliakov, *Opto-Electron. Rev.*, **18** (3), 2010, pp.236-240.

[2] *Индиевые микроконтакты для гибридной микросхемы*, Ефимов В. М., патент RU №2411610, 2011.

У02 Фотоприемный модуль формата 1024×10 для приборов космического применения на основе КРТ на область спектра 1-3 мкм

¹Филачев А.М., ^{1,3}Бурлаков И.Д., ^{1,2}Болтарь К.О., ¹Дражников Б.Н.,
¹Хромов С.С., ¹Кузнецов П.А.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

³ МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

Применяемый до сих пор для работы в заданном спектральном диапазоне фоточувствительный материал PbS имеет существенные недостатки – большая инерционность (постоянная времени 3-6 мс) и избыточный шум вида $1/f$ на частотах от 0 до 10 кГц. Очевидно, что потери сигнала при повышении скорости сканирования и соответствующего снижения длительности импульсного сигнала ведут к значительному снижению чувствительности ФПУ (потери при длительности импульса $t_0=0,5$ мс по сравнению с $t_0=2$ мс увеличиваются в 4 раза). Частотная характеристика ФПУ находится в пределах 1 кГц, т.е. в области, где преобладают избыточные шумы фоторезисторов типа $1/f$. Это способствует тому, что обнаружительная способность ФПУ на основе PbS ~ в 5 раз ниже предельной чувствительности соответствующей режиму ограниченному фоном (BLIP-режим).

Фотодиоды КРТ со спектральной характеристикой 2-3 мкм лишены этих недостатков и способны при этом работать при температурах охлаждения около (160-170) К, что подтверждается сравнительной зависимостью обнаружительной способности фоторезисторов PbS и фотодиодов КРТ от температуры охлаждения, полученной в результате экспериментальных исследований в ФГУП «НПО «Орион». Применение КРТ, по сравнению с PbS, позволит улучшить пороговый поток за счет повышения обнаружительной способности в 5 раз и за счет применения режима временной задержки и накопления с числом элементов 10 позволит поднять отношение сигнал/шум еще в 3,2 раза. Таким образом, материал КРТ при температуре охлаждения 170 К обеспечит заданный пороговый поток $(2÷3)·10^{-14}$ Вт/Эл и требуемое

быстродействие.

Впервые разработанный фотоприёмный модуль (ФМ) формата 1024x10 на основе фоточувствительного материала КРТ, показанный на рис.1 состоит из коварового основания, на которое устанавливается большая интегральная схема (БИС) считывания. Соединение фоточувствительного элемента с БИС считывания осуществляется методом «перевернутого монтажа» (flip-chip технология) через индиевые столбики-микроконтакты, высотой до 10 мкм.

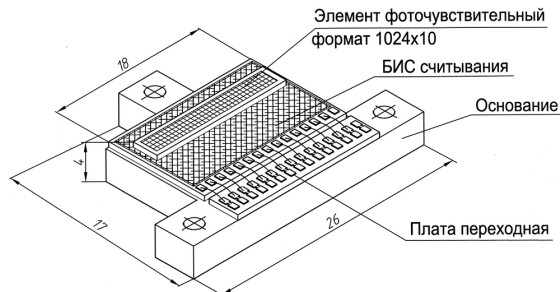


Рис.1 Фотомодуль формата 1024x10

Топология фоточувствительных элементов (ФЧЭ) фотомодуля содержит 1024 столбца по 10 фотодиодов, по которым с целью повышения чувствительности, осуществляется режим временной задержки и накопления (ВЗН). Режим ВЗН заключается в перемещении с задержкой и последующим суммированием N сигналов синхронно со скоростью передвижения изображения в фокальной плоскости. В ФПУ, построенных по этому принципу, появляется ряд следующих преимуществ:

1. возрастает отношение сигнал/шум в \sqrt{N} раз независимо от вида шумового спектра (НЧ или белый), а также, в условиях ограничения фоном;
2. уменьшается в \sqrt{N} раз разброс чувствительности по каналам ФПУ;
3. исключаются дефектные фотоприемники в процессе суммирования сигналов.

Основной задачей разработанной БИС считывания является детектирование сигналов точечных объектов с пороговой мощностью не более $3 \cdot 10^{-14}$ Вт на элемент. Основные функции, выполняемые во входных накопительных ячейках БИС считывания:

- сопряжение с ФЧЭ через индиевые микроконтакты и подача на ФЧЭ рабочего напряжения смещения ;
- интегрирование входного тока от ФЧЭ по схеме буферной прямой инжекции;
- вычитание постоянной и низкочастотной составляющих из входного тока (токи утечки, помехи, НЧ-шумы) т.е. проведение ВЧ-фильтрации входного сигнала;
- усиление переменной составляющей входного тока и преобразование ее в напряжение выходного сигнала;
- периодическая выборка и хранение напряжения выходного сигнала в течение времени считывания информации со всех 10 ФЧЭ на один общий выход каждого (1...1024) канала;
- отключение сигнала от любого ФЧЭ при наличии в нем дефекта (деселекция дефектов) с помощью ввода управляющего цифрового кода.

Функции, выполняемые каскадами ВЗН:

- временная задержка и накопление сигналов от 10 ФЧЭ в специальных устройствах — сумматорах заряда и как следствие - повышение отношения сигнал/шум

в $\sqrt{10}$ раз, а также снижение в $\sqrt{10}$ раз разброса вольтовой чувствительности каналов фотомодуля;

- преобразование суммарного заряда в сигнал напряжения для дальнейшего мультиплексирования на информационные выходы БИС считывания.

Расчет показывает, что шум канала БИС считывания определяется тепловым шумом накопительной емкости (kTC -шум) – $100 e^-$ при $T=170$ К и $C_{\text{нак}}=0,05$ пФ. При фоновом шуме $155 e^-$ (при $t_{\text{нак}}=250$ мкс и суммарном фоновом токе 10 пФ от Земли $T=300$ К и корпуса прибора $T=250$ К) общий шум составляет $185e^-$, т.е. шум канала БИС увеличивает общий шум в $1,2$ раза (или в $1,06$ раза при $T_{\text{нак}}=500$ мкс).

Организация управляющих сигналов всех составных частей БИС считывания в соответствии осуществляется при помощи формирователя сигналов, входящего в состав БИС. Синхросигналы на формирователь поступают от блока БУПОС, входящего в состав ФПУ и формирующего в свою очередь необходимые сигналы от сигналов управления, поступающих на ФПУ от внешних устройств.

БИС считывания выполнена по КМОП-технологии с нормами проектирования $0,35$ мкм.

Литература:

1. Г.А. Аракелов, В.Д. Бочков, Б.Н. Дрожников, Ю.А. Казарова, П.А. Кузнецов. 256-канальные фотоприемные устройства на основе фоточувствительных структур халькогенидов свинца. Прикладная физика №6 2008г.

2. А.М. Филачев, В.П. Пономаренко, Б.Н. Дрожников, В.Д. Бочков, Я.С. Бычковский. Двухспектральный фотоприемник. Патент на изобретение №2388115 от 27.04.2010г.

3. Б.Н. Дрожников, В.Д. Бочков. Фотоприемное устройство. Патент на изобретение №2392691 от 20.06.2010

У03 Аналитическая модель матричных и многорядных ИК МФПУ

¹Патрашин А.И., ^{1,2}Никонов А.В.,

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

Разработана аналитическая модель ИК МФПУ на основе фотодиодов. Рассмотрены два типа ИК МФПУ. Первый – на основе матрицы, работающей в режиме обычного накопления, в котором сигнал одного фотодиода соответствует одному элементу изображения. Второй – на основе матрицы, работающей в цифровом режиме временной задержки и накопления (ВЗН) со сканированием изображения. Цифровой режим ВЗН означает, что проводится считывание накопленного аналогового сигнала с каждого ФЧЭ, оцифровка его с помощью блока аналогово-цифровой обработки и последующее цифровое ВЗН-суммирование соответствующих сигналов и шумов.

Используются следующие экспериментально измеряемые и задаваемые характеристики: коэффициенты пропускания холодной диафрагмой произвольной формы паразитного (K_1) и полезного (K_2) фонового облучения, площадка ФЧЭ (A_0), формат матрицы ($M \times N$), темновой ток ФЧЭ (I_d), накопительная емкость в ячейке мультиплексора (C_n), квантовая эффективность ФЧЭ (η), спектральный диапазон чувствительности МФПУ (λ_1, λ_2), напряжение перезарядки емкостей накопления (E_0), время накопления (τ_0), форма и размеры выходного зрачка и задний отрезок или фокусное расстояние объектива.

Учен паразитный шум, обусловленный шумом мультиплексора (N_m) и излучением, попадающим на МФЧЭ из областей, находящихся вне объектива и имеющих известную температуру $T_{нар}$, которая может отличаться от температуры рабочего фона $T_{раб}$, проходящего через объектив.

Выведены связанные между собой аналитические выражения сигнала и шума, токовой (S_i) и вольтовой (S_u) чувствительности, ограниченной шумом облученности (NEI), ограниченной шумом мощности (NEP), удельной обнаружительной способности (D^*), ограниченной шумом разности температур ($NETD$), динамического диапазона (DR) и зависимости этих параметров от конструктивных характеристик МФПУ, от шума мультиплексора и от температур рабочего и паразитного фона.

Выведенные аналитические выражения универсальны. Переход от многорядных матриц, работающих в режиме ВЗН, к обычным матрицам получается при отмене суммирования по одному из индексов.

Выражения для шума и сигнала ФЧЭ в сканируемых и смотрящих МФПУ имеют следующий вид:

$$N_{ш\ скан\ j} = \sqrt{\sum_{i=1}^M \left\{ \left[\frac{I_d^{ij}}{q} + [(K_1^{ij} - K_2^{ij}) \cdot N(T_{нар}; \lambda_1; \lambda_2) + K_2^{ij} \cdot N(T_{раб}; \lambda_1; \lambda_2)] \cdot A_0 \cdot \eta_{ij} \right] \cdot \tau_0 + N_m^2 \right\}} \quad [\text{электронов}]$$

$$N_{ш\ смотр\ ij} = \sqrt{\left\{ \left[\frac{I_d^{ij}}{q} + [(K_1^{ij} - K_2^{ij}) \cdot N(T_{нар}; \lambda_1; \lambda_2) + K_2^{ij} \cdot N(T_{раб}; \lambda_1; \lambda_2)] \cdot A_0 \cdot \eta_{ij} \right] \cdot \tau_0 + N_m^2 \right\}} \quad [\text{электронов}]$$

$$N_{с\ скан\ j} = N(T_{раб}; \lambda_1; \lambda_2) \cdot A_0 \cdot \tau_0 \cdot \sum_{i=1}^M K_2^{ij} \cdot \eta_{ij} \quad [\text{электронов}]$$

$$N_{с\ смотр\ ij} = N(T_{раб}; \lambda_1; \lambda_2) \cdot A_0 \cdot \tau_0 \cdot K_2^{ij} \cdot \eta_{ij} \quad [\text{электронов}]$$

Выражения для K_1 , K_2 , $N(T; \lambda_1; \lambda_2)$, $P(T; \lambda_1; \lambda_2)$ описаны в [1].

Предлагаемая модель будет полезна как разработчикам ФПУ, так и их изготовителям. Разработчики могут с ее помощью оценить граничные величины конструктивных и рабочих параметров, при которых достигается необходимое значение главного фотоэлектрического параметра или параметров. Изготовители, измеряя конструктивные и рабочие параметры и сравнивая их с граничными параметрами, также смогут оценить возможность изготовления прибора с заданными характеристиками.

Литература

[1] Патрашин А.И. // Прикладная Физика, 2011. № 3. С. 102.

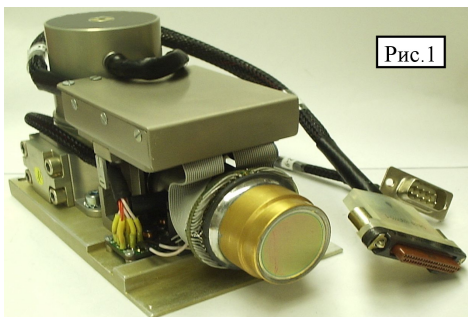
У04 Характеристики серийных матричных фотоприемных устройств на основе антимонида индия формата 320×256

^{1,2}Болтарь К.О., ¹Власов П.В., ¹Лопухин А.А., ¹Полунеев В.В., ¹Рябова А.А.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

Для обеспечения серийного выпуска МФПУ из антимонида индия (рис. 1) необходимо непрерывное совершенствование всех компонентов.



Значительного улучшения фотоэлектрических характеристик удалось добиться за счет разработки нового малошумящего блока сопряжения. Благодаря реализации полностью дифференциальной схемы 8-ми канального подключения по всему тракту прохождения выходных сигналов удалось получить функционирование МФПУ в режиме шума, ограниченного флуктуациями фонового излучения (BLIP-режим) в широком диапазоне уровня разряда накопительных конденсаторов ячеек МФПУ (рис. 2).

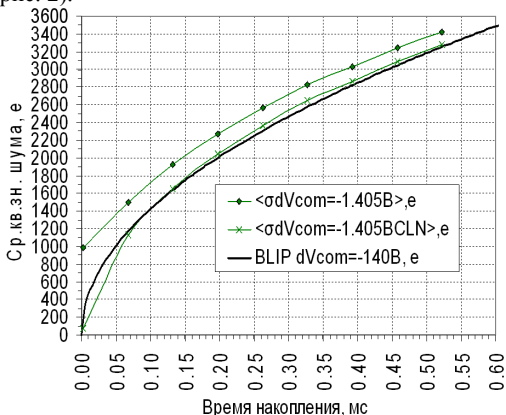


Рис.2 Зависимости среднеквадратичного значения шума и теоретического значения шума для BLIP-режима от времени накопления

Из рисунка видно, что шум электроники при времени накопления равно нулю составляет ~ 1000 электронов на накопительном конденсаторе в ячейке. При вычитании по квадратам из шума МФПУ шума электроники, что справедливо в случае некоррелированности этих шумов, видно хорошее совпадение вычитенного шума с теоретическим шумом, ограниченным флуктуациями фонового излучения, что свидетельствует об отсутствии избыточных собственных шумов InSb фотодиодов. Из графиков на рис.2

следует, что при оптимальном времени накопления фотоэлектронов ($\sim 0,55$ мс при относительном отверстии охлаждаемой диафрагмы 1:0,94), обеспечивающем 70% разряд емкости накопления БИС считывания, дополнительный шум за счет шумов БИС считывания, блока сопряжения и системы аналого-цифрового преобразования выходного сигнала не превышает 6% фундаментального шума фонового излучения.

На рис. 3 представлены распределения дефектных элементов для технологии изготовления МФПУ с приклейкой (ZnS) и с утоншением после гибридной (ТБ). Видно, что средняя дефектность для обеих технологий составляет $0,22 \pm 0,24$ %. Полученные результаты свидетельствуют о независимости дефектности от вида используемой технологии изготовления МФПУ и, скорее всего, дефектность связана с исходным материалом и с обработкой лицевой поверхности InSb пластин.

На рис. 4. представлено распределение температурного разрешения эквивалентного шуму при оптимальном времени накопления серийных МФПУ.

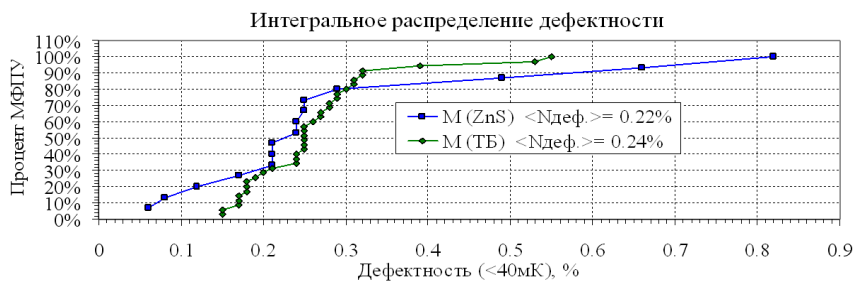


Рис.3 Интегральное распределение дефектности для технологии изготовления с приклейкой (ZnS) и с утоньшением после гибридизации (ТБ) серийных МФПУ

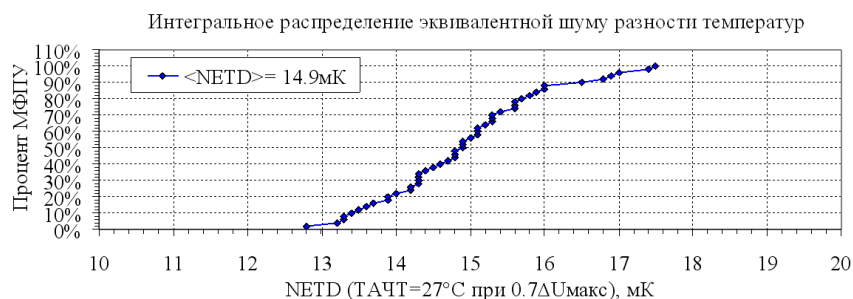


Рис.4 Интегральное распределение температурного разрешения эквивалентного шуму при оптимальном времени накопления серийных МФПУ

У05 Неохлаждаемые микроболومترические фотоприемные устройства форматом 320×240 и 160×120 на основе оксидов ванадия для инфракрасного и терагерцового диапазонов

Алиев В.Ш., Демьяненко М.А., Есаев Д.Г., Марчишин И.В., Овсяк В.Н., Фомин Б.И., Князев Б.А.

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

Разработанная нами ранее [1,2] технология изготовления неохлаждаемых матричных микроболومترических приемников (ММБП), основанная на золь-гель методе получения термочувствительных слоев оксидов ванадия (VO_x), позволила создать фотоприемные устройства (ФПУ) форматом 320x240 и 160x120 с эквивалентной шуму разностью температур (NETD) менее чем 100 мК при угле зрения 60° и частоте кадров 50 Гц. В настоящей работе приводятся результаты усовершенствования технологии путем применения ионно-лучевого метода получения слоев VO_x . Мишень из металлического ванадия распылялась в вакуумной камере в присутствии кислорода высокой чистоты. Слои VO_x наносились при комнатной температуре. Однородность слоевого сопротивления составляла около 7% на пластине диаметром 76 мм. Слоеое сопротивление задавалось парциальным давлением кислорода в вакуумной камере и скоростью распыления ванадиевой мишени. Типичные толщины слоев около 120 нм выращивались за 40-50 минут.

Применение ионно-лучевой технологии нанесения слоев VO_x позволило: 1) - повысить однородность термочувствительных слоев по сопротивлению (рис. 1), что, в свою очередь, позволяет использовать более высокие коэффициенты усиления сигнала A_V и большее время его интегрирования и, следовательно, повысить чувствительность S_T и понизить шумы (см. таблицу); 2) - повысить коэффициент температурного сопротивления термочувствительных слоев (рис. 2) и 3) - существенно понизить величину $1/f$ шума микроболометров, который проявляется в увеличении интегрального шума ФПУ V_n , при изменении напряжения смещения болометров от нуля - $V_n(0)$ до двух вольт - $V_n(2)$ (см. таблицу). В результате NETD для ФПУ форматом 320x240 с шагом 51 мкм была понижена до величин 50 мК и менее при угле зрения 60° и частоте кадров 50 Гц (рис.3).

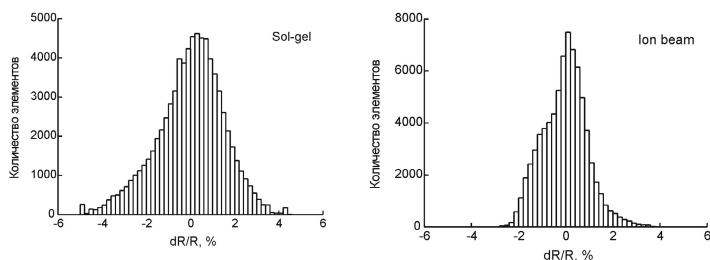


Рис. 1. Гистограммы распределения разброса сопротивлений микроболометров по матрицам ФПУ форматом 320x240, изготовленных по золь-гель и ионно-лучевой технологиям.

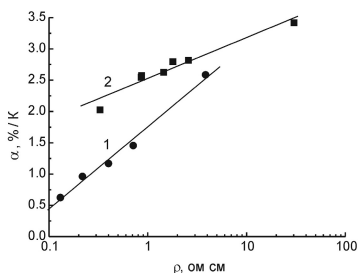


Рис.2. Зависимость температурного коэффициента сопротивления слоев оксидов ванадия от их удельного сопротивления. (1) - золь-гель и (2) -ионно-лучевая технологии.



Рис.3. Тепловое изображение, полученное с использованием неохлаждаемого ФПУ формата 320x240, работающего на частоте 50 Гц, и германиевого объектива F/1.

Таблица. Сравнение параметров ФПУ, изготовленных двумя разными технологиями.

Номер ФПУ	$V_n(2)$, мВ	$V_n(0)$, мВ	S_T , мВ/К	A_V	S_T / A_V , мкВ/К	NETD, мК
Технология ионно-лучевого распыления-осаждения						
0_2А	0,51	0,45	9,67	41,4	234	54
0_7	0,31	0,29	6,59	27,6	239	49
0_9	0,38	0,37	9,92	40,3	246	38
Золь-гель технология						
8_1	0,51	0,37	6,84	35,5	193	75
8_2	0,50	0,35	4,92	33	149	102
8_3	0,40	0,30	3,35	22	152	121

Учитывая, что усовершенствование технологии касалось только слоев VO_x , которые сами не производят значительного поглощения инфракрасного и терагерцового излучения [3], можно полагать, что достигнутое в инфракрасном диапазоне двукратное уменьшение NETD и, следовательно, пороговой мощности $P_{th,IR}$, распространяется также и на терагерцовый диапазон, в котором пороговая мощность $P_{th,THz}$ [3] на длине волны 130 мкм теперь должна ожидаться равной 15 нВт/пиксель.

1. Овсяк В.Н., Шашкин В.В., Демьяненко М.А., Фомин Б.И., Васильева Л.Л., Соловьев А.П. Неохлаждаемые матричные микроболометрические приемники ИК излучения на основе золь-гель VO_x . // Прикладная физика, 2005. № 6. С.114-117.
2. Демьяненко М.А., Фомин Б.И., Васильева Л.Л., Волков С.А., Марчишин И.В., Есаев Д.Г., Овсяк В.Н., Дшхунян В.Л., Володин Е.Б., Ермолов А.В., Усов П.П., Чесноков В.П., Четверов Ю.С., Кудрявцев П.Н., Здобников А.Е., Игнатов А.А. Неохлаждаемое микроболометрическое фотоприемное устройство формата 320x240 на основе золь-гель VO_x . // Прикладная физика, 2010. № 4. С.124-130.
3. Демьяненко М.А., Есаев Д.Г., Овсяк В.Н., Фомин Б.И., Марчишин И.В., Алиев В.Ш., Князев Б.А., Герасимов В.В., Кулипанов Г.Н., Винокуров Н.А., Литвинцев В.И. Разработка и применение неохлаждаемых матричных микроболометров для терагерцового диапазона. // «Вестник НГУ», серия «Физика», 2010. Т.5. №.4. С. 73-78.

У06 Исследование температурных характеристик матричных ФПУ на основе структур с квантовыми ямами

Барабанов А.Б., Бирюлин П.В., Куликов В.Б., Солодков А.А., Тарасов В.В., ¹Чалый В.П.

ОАО «ЦНИИ «Циклон», Москва, Россия

¹ ЗАО «Светлана-Рост», Санкт-Петербург, Россия

Недостатками матричных ФПУ на основе структур с квантовыми ямами (СКЯ), сдерживающими их применение в тепловизионной технике, являются более низкая, чем у ФПУ из материалов с собственной фотопроводимостью, рабочая температура и более низкая квантовая эффективность. Первый недостаток приводит к необходимости использования для охлаждения ФПУ микрокриогенных систем (МКС) с повышенной холодопроизводительностью и, как следствие, с повышенным потреблением электроэнергии. Второй недостаток вынуждает использовать для получения эквивалентной чувствительности большие времена накопления сигнала, что приводит к ограничению частоты кадров и препятствует использованию ФПУ на основе СКЯ в тепловизионных системах с повышенным быстродействием.

При этом температурные и временные характеристики ФПУ взаимосвязаны, поскольку возрастающий при повышении рабочей температуры темновой ток, заполняя накопительную емкость мультиплексора, ограничивает возможность повышения чувствительности за счет увеличения времени накопления.

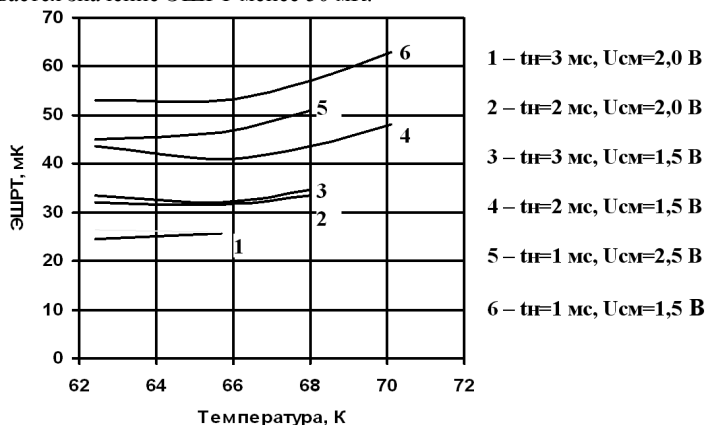
Целью настоящей работы является исследование зависимости характеристик ФПУ на основе СКЯ от рабочей температуры и времени накопления.

Гибридные фоточувствительные схемы (ГФС) для ФПУ были изготовлены с использованием мультиплексора, имеющего формат 320x256 и шаг накопительных ячеек 30 мкм. ГФС были смонтированы в вакуумном металлокерамическом криостате, охлаждаемом МКС типа МСМГ-3А-0,6/80. Криостат был снабжен охлаждаемой диафрагмой с диафрагменным числом 1,8. Собственный теплоприток криостата, измеренный по стандартной методике с учетом теплоты отходящих паров жидкого

азота не превышал 0,35 Вт. Температура ГФС контролировалась диодным температурным датчиком и изменялась регулировкой микрокриогенной системы. В состав ФПУ входили также закрепленные на криостате малошумящие предварительные усилители и логический повторитель управляющих сигналов.

Параметры ФПУ измерялись на стенде, обеспечивавшем засветку матрицы широкоапертурным АЧТ и оцифровку сигналов 14-разрядным АЦП с последующей обработкой компьютером. В память для обработки записывались по 32 кадра при температурах АЧТ 20°С и 30°С.

На рисунке представлены зависимости эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ) от температуры ГФС при различных временах накопления и напряжениях смещения для одного из ФПУ. Аналогичные зависимости были получены также для температурной чувствительности и напряжения шума. Анализ полученных зависимостей показал, что с увеличением времени накопления и напряжения смещения в определенных пределах имеет место увеличение температурной чувствительности и напряжения шума и уменьшение ЭШРТ. При дальнейшем увеличении времени накопления и/или напряжения смещения происходит насыщение сигнала. Область допустимых значений времени накопления и напряжений смещения зависит от рабочей температуры матрицы. При температуре 65 К насыщение не наблюдалось при времени накопления 2 мс и напряжении смещения 2,5 В или при времени накопления 3 мс и напряжении смещения 2 В. В этих режимах обеспечивается значение ЭШРТ менее 30 мК. При повышении рабочей температуры до 70 К область допустимых значений времени накопления ограничивается 2 мс при напряжении смещения 1,5 В. При этом обеспечивается значение ЭШРТ менее 50 мК.



Полученные значения ЭШРТ сопоставимы с результатами, достигнутыми в зарубежных ФПУ на основе СКЯ аналогичной конструкции. При этом для охлаждения ФПУ на основе СКЯ формата 320x256 можно использовать серийную МКС типа МСМГ-3А-0,6/80. При нормальной температуре окружающей среды потребляемая мощность в рабочем режиме с температурой криостатирования 65 К не превышает 30 Вт, при температуре криостатирования 70 К потребляемая мощность не превышает 20 Вт. В этих режимах обеспечивается значение ЭШРТ ФПУ 30 и 50 мК соответственно.

У07 Фурье-спектрометр, как система голографического изображения микрообъектов в ИК диапазоне

Каленков С.Г., Каленков Г.С., Штанько А.Е.

МГТУ «МАМИ», Москва, Россия

Фурье спектрометр является интерференционным прибором, который, по мнению авторов, может предоставить интересные возможности для создания изображающей оптической системы. В настоящей работе рассматривается возможность получения изображения микрообъектов с помощью Фурье спектрометра.

В наших работах [1,2] было рассмотрено применения метода фазовых шагов для получения цифрового голографического изображения микрообъектов, но для когерентного излучения.

Особенность предлагаемого метода голографической записи состоит в том, что для регистрации голограммы микрообъектов используется низкокогерентный источник света. Задачей «традиционной» Фурье-спектрометрии, по сути, является определение спектрального состава света, поступающего на фотоприемник, так как он, в конечном итоге, содержит всю информацию о спектральных свойствах образца. В данном случае мы будем считать, что спектральный состав света, падающий на объект, нам известен и что сам объект не вносит заметных искажений в спектр.

Как и в асимметричных интерферометрах, предназначенных для исследования комплексного показателя преломления образцов, микрообъект установлен на месте неподвижного зеркала, а в каждом пикселе ПЗС матрицы регистрируется своя интерферограмма. Показано, что комплексная амплитуда объектного поля $A(\sigma\theta)$ в плоскости регистрации (на ПЗС матрице) определяется выражением:

$$A(\sigma\theta) = \frac{\int G(\theta,\delta) \exp(2\pi i \sigma \delta) d\delta}{S(\sigma)} \quad (1)$$

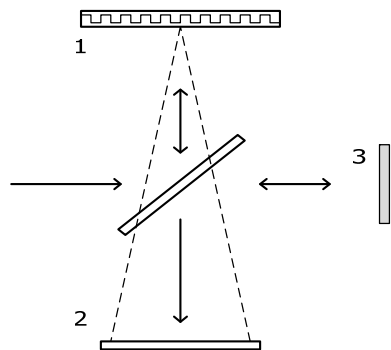


Рис. 1 принципиальная схема Фурье спектрометра

($\sigma = \lambda^{-1}$) - волновое число или спектральная частота излучения источника (λ - длина волны), $\Delta\sigma$ - величина спектрального окна освещающего излучения, $S(\sigma)$ - плотность излучения на частоте σ , $G(\theta,\delta)$ - интерферограмма в точке θ ПЗС матрицы, δ - расстояние подвижного зеркала от положения нулевой разности хода. Показано также пространственное распределение объекта получается обратным Фурье-преобразованием функции $A(\sigma\theta)$.

Возможность отображения пространственных характеристик объекта на основе метода Фурье-спектроскопии была подтверждена нами экспериментально. Принципиальная оптическая схема прибора изображена на рис.1.

Экспериментальная часть включала в себя разработку оптической схемы интерферометра, работающего в полихроматическом излучении видимого диапазона. Такой интерферометр регистрирует серию интерференционных картин от наложения двух волн при плавном изменении разности хода между ними, причем одна из волн дифрагирует на микрообъекте, а другая служит в качестве опорной волны.

Отражающий микрообъект 1 установлен в одном плече интерферометра Майкельсона на месте неподвижного зеркала. При отражении от объекта дифрагированная волна попадает на ПЗС матрицу 2 и интерферирует с волной, отраженной от подвижного зеркала 3. Таким образом, ПЗС матрица регистрирует интерференционную картину, образованную дифрагированной от объекта предметной волной и опорной волной – волной отраженной от подвижного зеркала. В отличие от обычного Фурье спектрометра, в данном случае мы используем вместо точечного фотоприемника ПЗС матрицу для регистрации всей интерференционной картины. Можно образно сказать, что в каждом пикселе ПЗС матрицы регистрируется своя интерферограмма, которая и несет информацию о пространственных характеристиках объекта.

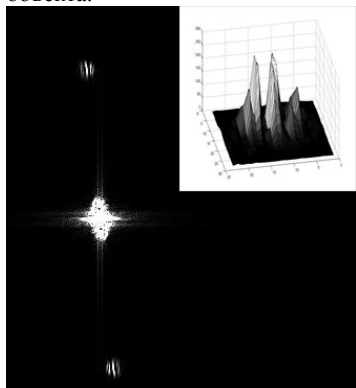


Рис. 2 Изображение объекта - амплитудной решетки – полученного для разных спектральных компонент излучения

использованной в качестве объекта. По нашему мнению, предлагаемый метод имеет хорошие перспективы для записи голограмм микрообъектов в ИК диапазоне.

Литература

- [1] N. G. Vlasov, S. G. Kalenkov, D. V. Krilov and A. E. Shtanko, "Non-lens digital microscopy", Proc. SPIE 5821, 158 (2005);
- [2] Каленков С. Г., Власов Н. Г., Крылов Д. В., Штанько А. Е. “Безлинзовая цифровая микроскопия”. Естественные и технические науки, Т.3. № 12. С.117--120. (2004).

По предложенной схеме была записана серия интерферограмм. В качестве микрообъекта был использован фрагмент амплитудной дифракционной решетки частотой 10 мм^{-1} , имеющей прямоугольный профиль штрихов. Источником излучения служила галогенная лампа. Ввод излучения в интерферометр осуществлялся через оптическое волокно диаметром 6 мкм. Регистрация голограмм производилась на матрицу цифровой фотокамеры, содержащей 3072×2048 пикселей. Полученные интерферограммы $G(\theta, \delta)$ использованы для расчета комплексной амплитуды поля в плоскости регистрации по формуле (1). На рис. 2 представлено полученное распределение интенсивности поля в плоскости объекта. На картинке отчетливо виден прямоугольный профиль штрихов решетки,

Y08 Graphene-based electro-optical modulators: effect of plasma oscillations resonant excitation

(Электро-оптические модуляторы на основе графена: влияние плазменных колебаний)

V. Ryzhii^{1,3}, T. Otsuji¹, M. Ryzhii², N. Ryabova², S.O. Yurchenko³, M.S. Shur⁴

¹*Research Institute for Electrical Communication, Tohoku University, Japan*

²*Computational Nanoelectronics Laboratory, University of Aizu, Japan*

³*Center of Photonics and Infrared Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Russia*

⁴*Department of EECS Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, USA*

We propose device models for electro-optical modulators based on graphene structures operating in different ranges of spectrum. The principle of operation is associated with the control of the Pauli blocking effect in the interband absorption. The modulators of the mirror (with the transverse input and output of optical radiation) and waveguide (with lateral input and output) types are considered. The features of modulators for both infrared and terahertz radiation are taken into account. Using the developed models, we calculate the modulation characteristics as functions of the devices structural parameters and the modulation frequency. It is shown that the resonant excitation of the standing plasma waves in graphene structures can provide the possibility of effective modulation of infrared radiation by terahertz radiation and mixing of two-terahertz signals.

Y09 Terahertz and infrared graphene optically-pumped and injection lasers: concept, comparison, and problems of realization

V. Ryzhii¹, M. Ryzhii², V. Mitin³, A. Satou¹, and T. Otsuji¹

¹*Research Institute for Electrical Communication, Tohoku University, Japan*

²*Computational Nanoelectronics Laboratory, University of Aizu, Japan*

³*Department of Electrical Engineering, University at Buffalo, Buffalo, USA*

The concepts of terahertz and infrared lasers based of multiple graphene layer (GL) structures with gapless energy spectrum, which were proposed by us previously, are considered. The features of both optically-pumped lasers and lasers based on GL p-i-n junctions utilizing the double injection of electrons and holes are considered. It is found that the intercarrier scattering plays an important role in the relaxation of the photogenerated electrons and holes. In the case of optical pumping by near infrared radiation, the electron and hole heating can effectively prevent the realization of the interband population inversion. This effect reinforces by the pertinent heating of optical phonon system. However, at the pumping by middle infrared radiation with the photon energy smaller that 0.1 eV, the electron and hole cooling can occur. This is beneficial for the realization the population inversion and lasing. In the GL p-i-n structures with the double injection of relatively low energy electrons and holes, the cooling effects can be even more pronounced. The latter provides substantial advantages of the injection pumping in comparison with the optical pumping (apart from the obvious convenience). The obtained experimental results and the problems associated with the realization of the lasers in question, particularly, those operating at room temperatures are discussed.

У10 Продольный вторично-ионный фотоэффект на структуре SiO-AlGaAs-GaAs

Сердобинцев А.А., Александров В.А., Шишкин М.И., Роках А.Г.

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Россия

Изучение вторично-ионного фотоэффекта (ВИФЭ), проводимое до настоящего времени в основном на пленках типа CdS-PbS, шло по пути сравнения его с поперечной фотопроводимостью. Это было оправдано геометрией ионного травления, при которой ток первичного ионного пучка стекал на заземленный держатель образца по поверхности мишени, проводимость которой уменьшалась при освещении. Иную ситуацию мы наблюдаем на заглавной полупроводниковой структуре, используемой в приборах ночного видения. Поскольку эта структура обнаружила заметный аномальный ВИФЭ (увеличение выхода вторичных ионов при освещении), были проведены его исследования при геометрически различном прохождении тока от первичного ионного пучка.

Для проведения указанных измерений на исследуемую структуру наносились медные электроды вакуумным термическим напылением полупрозрачной пленки меди. При этом на SiO электроды наносились в форме двух встречно-штыревых гребенок (ВШП), а на подложку из GaAs тем же способом наносился сплошной медный электрод. Поскольку нижний (рис. 1,б) или оба эти электрода (Рис. 1,а) заземлялись, то путь стекания тока первичных ионов можно было изменять. Бомбардировка осуществлялась ионами Ag^+ на масс-спектрометре РН1 4300 (Perkin-Elmer, США). Ток пучка 150 нА, напряжение 4 кВ. Освещение осуществлялось от галогенной лампы мощностью 90 Вт.

На рис. 1 показан профиль выхода ионов Si^+ , Al^+ и Ga^+ . Включение и выключение света производилось с интервалом в 2 мин.

Протравливание верхнего медного электрода имело место на глубине примерно 350 нм, а плёнки SiO – 100 нм. При включении света выход вторичных ионов кремния увеличивался в обоих случаях и мог в два раза превосходить темновой выход (аномальный ВИФЭ). После протравливания слоя SiO ВИФЭ на ионах кремния продолжал наблюдаться, а его амплитуда снижалась по мере увеличения глубины травления. Максимум на кривой выхода ионов Al^+ может объясняться протравливанием слоя AlGaAs при проникновении первичного пучка на 600 нм. В случае заземления обоих контактов (рис. 1а), по всем регистрируемым ионам наблюдался аномальный ВИФЭ, однако при снятии заземления с ВШП (рис. 1б), ВИФЭ изменяет свой характер (рис. 1б). Во-первых, он становится меньше, во-вторых, меняет знак на ионах Al^+ и Ga^+ , становясь нормальным (отрицательным). При этом на ионах Si^+ эффект остается аномальным. Суммарная величина эффекта является разностью между аномальным и нормальным ВИФЭ.

Детальное объяснение наблюдавшегося эффекта по-видимому связано с учетом различной зарядки поверхности мишени при разных схемах заземления электродов и требует дальнейших исследований.

Таким образом, характер ВИФЭ зависит от геометрического расположения фаз в момент травления относительно земли, и для ионов, входящих в состав разных фаз, может иметь разный знак.

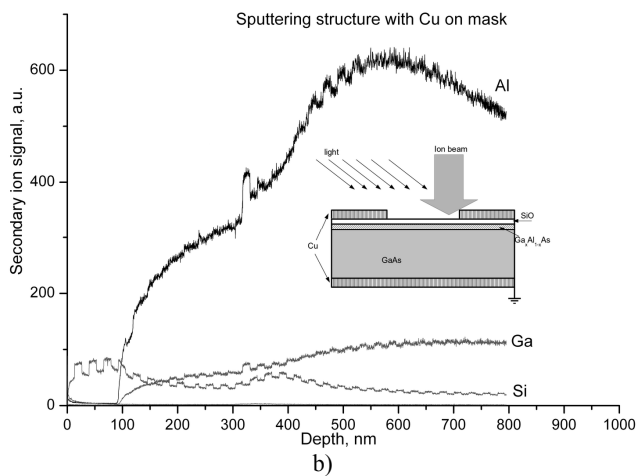
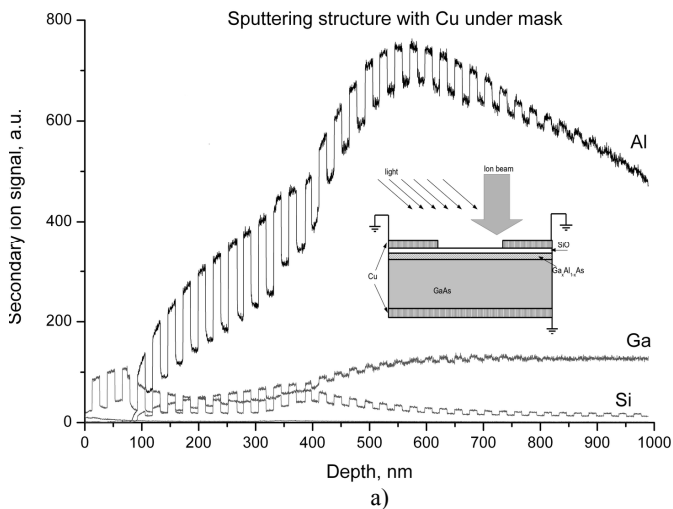


Рис 1. Профили выхода вторичных ионов:
 а) — Заземлённые ВШП, б) — незаземлённые ВШП

Исследовалось также обычное (электронное) поведение образца в виде спектральной зависимости фототока и фото-эдс.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 11-08-00529-а и 11-08-12058-офи-м.

У11 Фотоиндуцированный выход вторичных ионов из структуры SiO-AlGaAs-GaAs

Роках А.Г., Матасов М.Д., Сердобинцев А.А., Александров В.А.

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Россия

Влияние подсветки на ионное распыление полупроводников и диэлектриков получило название вторично-ионный фотоэффект (ВИФЭ). Здесь показаны возможности применения этого эффекта для качественной характеристики фотокатодной полупроводниковой структуры, используемой в приборах ночного видения [1]. Исследование механизмов ВИФЭ открывает путь к новой области технологии и метрики – фото- и оптоионике [2, 3].

Исследования проводились на комбинированном оже- и масс-спектрометре РНИ 4300 (Perkin-Elmer, США). Для подсветки использовалась галогеновая лампа мощностью 90 Вт. Распыление велось пучком ионов Ag^+ с энергией 4 кэВ. Образец представлял собой пленку SiO толщиной 90 нм, нанесенную термическим испарением на подложку из низкоомного арсенида галлия с подслоем AlGaAs.

На рис. 1 приведен график зависимости выхода вторичных ионов из исследуемого образца от глубины травления. В начальный момент времени происходит травление слоя SiO, который протравливается за первые 4 минуты процесса, затем начинается распыление промежуточного слоя AlGaAs, о чем свидетельствует выход ионов Ga^+ и Al^+ из подложки. Уровень выхода ионов Al^+ растёт, достигает максимума и плавно снижается до постоянного.

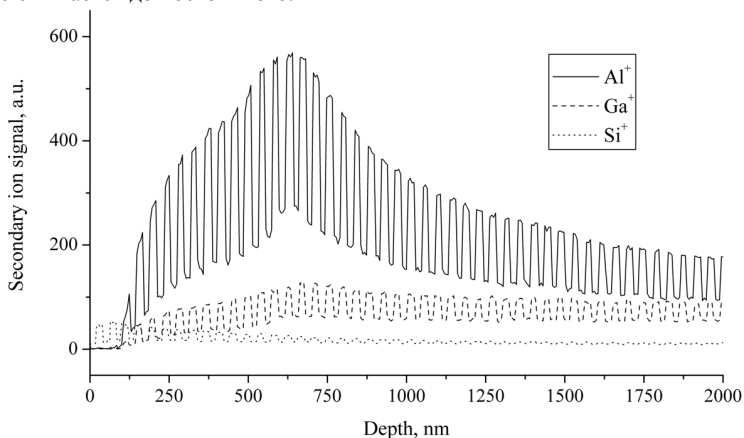


Рис. 1. Профиль выхода вторичных ионов из структуры SiO-AlGaAs-GaAs при импульсном освещении

На всём протяжении процесса распыления образец подвергался дополнительному освещению с периодичностью 2 минуты и 0,5. Характерной чертой всех регистрируемых вторичных ионов является увеличение их выхода на свету (аномальный ВИФЭ).

Как следует из предыдущих исследований [2], аномальный ВИФЭ обычно коррелировал с люминесценцией мишени. Поэтому для объяснения особенностей ВИФЭ на этой структуре целесообразно было исследовать люминесценцию. Результаты исследования катодолюминесценции (КЛ) приведены ниже.

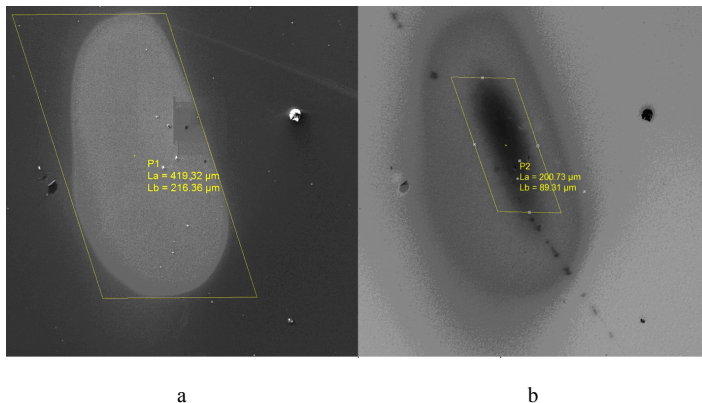


Рис 2. Электронно-микроскопическая фотография (Tescan Mira II LMU) кратера ионного травления пленки SiO на подложке AlGaAs-GaAs: а - во вторичных электронах, б - КЛ

На рис. 2а представлено изображение кратера травления во вторичных электронах, которое показывает, что участок травления выглядит более ярким, чем ненарушенная часть пленки SiO. Это изображение дают вторичные электроны выходящие из GaAs, который, обладая большим средним атомным номером, чем SiO, дает и больший выход вторичных электронов.

Рис. 2б показывает КЛ частично протравленного наклонным ионным пучком участка пленки SiO и окружающего участка ненарушенной травлением пленки SiO. Мы видим, что частично протравленный участок имеет более слабую КЛ, чем фон. В полностью протравленном участке КЛ совсем исчезает, поскольку детектор КЛ чувствителен от 350 до 650 нм. Этого оказалось недостаточно, чтобы зарегистрировать более длинноволновую КЛ подложки, на которую нанесен SiO. Таким образом, КЛ SiO регистрируется, а ее интенсивность падает с уменьшением толщины монооксида в области кратера.

На основе полученных результатов возможна разработка методики прецизионного определения границ раздела и их параметров в многослойных фотоприемных структурах.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 11-08-00529-а и 11-08-12058-офи-м

[1]. Стафеев В.И., Инжекционные фотодиоды, XIX Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, Россия (2006) 16.

[2]. А.Г. Роках, М.Д. Матасов, А.Г. Жуков. Спектральное управление вторично-ионным фотоэффектом: путь к оптоионике? Российские нанотехнологии 5 (2010) 390.

[3]. A.G. Rokakh, A.A. Serdobintsev, S.V. Stetsyura, A.G. Zhukov, M.D. Matasov, I.V. Malyar, Optical Control of Ion Sputtering, In: J. K. Lang. N.-Y., (Eds.), Handbook on Mass Spectrometry: Instrumentation, Data and Analysis and Applications (2009) p. 325-344.

У12 Оценка мощности световой накачки узкозонной фазы при фотоиндуцированном ионном распылении

Матасов М.Д., Роках А.Г.

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Россия

Наиболее интересным видом вторично-ионного фотоэффекта является его аномальный тип, заключающейся в увеличении выхода вторичных ионов при освещении мишени [1]. Существует модель, качественно описывающая увеличение выхода вторичных ионов в пленках ограниченных твердых растворов CdS-PbS [2]. Актуальной задачей является аналитическое описание процесса увеличения выхода вторичных ионов.

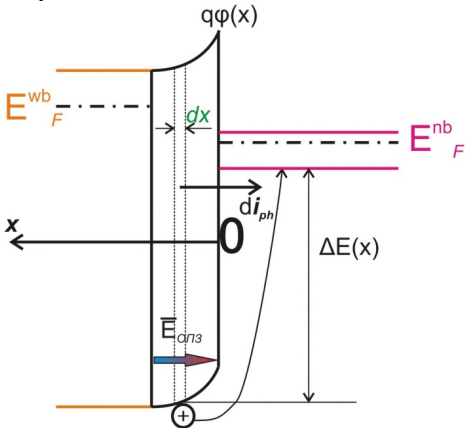


Рис. 1. Зонная диаграмма, иллюстрирующая процесс термолинизации неравновесных носителей инжектированных в узкозонную фазу

Переходя из одной области в другую (рис. 1), носители рассеивают на фонах часть своей энергии, равной разности энергии которую они имели в области пространственного заряда широкозонной фазы и энергии, которую они приобрели, попав в узкозонную фазу (термолинизация) [3]. При таком переходе носителей увеличивается энергия тепловых колебаний решетки, что способствует увеличению выхода ионов, при распылении.

Оценим мощность P , которая выделяется при термолинизации инжектированных неравновесных носителей.

$$P = \left(\Delta E_g + q\Delta\chi - \frac{4}{3}\Delta E_{F0} \right) AF_\varphi - \frac{2}{3}kTAF_\varphi \cdot \ln \left(1 + \frac{qAF_\varphi}{I_s} \right) \quad (1)$$

где ΔE_g -разница значений ширины запрещённой зоны в широкозонной и узкозонной части, $q\Delta\chi$ - разница энергий сродства электрона в широкозонной и узкозонной части, ΔE_{F0} - разница положений уровней Ферми в широкозонной и узкозонной части в отсутствии освещения, F_φ - поток фотонов. A - коэффициент поглощения света всей ОПЗ, q - заряд электрона, k -постоянная Больцмана, T - температура, I_s - ток насыщения.

Расчёты проведены для описанной выше модели (рис. 1) сильно рассеивающего образца, содержащего области пространственного заряда, для значения мощности падающего излучения в диапазоне от 1 мкВт до 100 мкВт, характерной для основного поглощения, соответствующего длине волны 550 нм, полосы шириной около 10 нм монохроматора ЗМР-3 с галогеновой лампой 60 Вт, в качестве источника. Эта мощность концентрируется в среднем на пятне величиной в 1 мм^2 . Приняв ширину ОПЗ равную $L_{scr} \approx 250 \text{ нм}$, получим значение мощности, выделяющейся на единицу площади, в слое толщиной R_0 , равное $3,6 \text{ Вт/м}^2$, что в более удобных единицах составляет

$$\frac{P_i(R_0)}{S} \approx 6,7 \cdot 10^{-3} \div 0,67 \frac{\text{эВ}}{\text{нм}^2 \cdot \text{с}}$$

$$\frac{P_{ni}(R_0)}{S} \approx 1,62 \cdot 10^{-11} \div 1,62 \cdot 10^{-7} \frac{\text{эВ}}{\text{нм}^2 \cdot \text{с}}$$

Оценивая значение нелинейной по потоку квантов света составляющей мощности накачки, можно понять, что её вклад при данных мощностях освещения исчезающе мал. Итак, полная мощность накачки, выделяющаяся за счёт стока неравновесных носителей в узкозонную фазу составит

$$\frac{P(R_0)}{S} \approx 6,7 \cdot 10^{-3} \div 0,67 \frac{\text{эВ}}{\text{нм}^2 \cdot \text{с}}$$

При рассуждениях предполагается, что кристаллическая решётка претерпевает локальный разогрев [4] за счет «накачивания» энергией узкозонной фазы. Направление изгиба зон определяется из тех соображений, что в исследуемых плёнках твёрдых растворов отсутствует фото память, поэтому широкозонная часть должна быть обеднена зарядами. Из явления фотоваристорного эффекта, характерного для пленок CdS-PbS, также следует обеднение широкозонной фазы. При освещении в общем случае происходит понижение потенциального барьера (рис. 1). Электронно-дырочные пары образовавшиеся в области ОПЗ, разделяются полем, притом электроны, скатываясь по потенциалу барьера, оказываются в широкозонной фазе. Накапливаясь, электроны начинают туннелировать в узкозонную область.

Сравним спектральную мощность световой накачки и первичного ионного пучка. Оценим сверху плотность мощности, передаваемой образцу, за счёт бомбардировки образца ионным пучком P_{0i} ,

$$P_{0i} = j_{ion} U_{acc} \quad (2)$$

где j_{ion} – плотность тока первичных ионов, U_{acc} – ускоряющее напряжение. Диапазон значений токов ионного пучка составляет от 50 нА до 500 нА. Площадь фокусировки от 1 мм² до 1 см². Ускоряющее напряжение - несколько киловольт. Тогда среднее значение мощности, передаваемой образцу ионным пучком на единицу площади варьируется в диапазоне, $P_{0i} \approx 15 \div 15 \cdot 10^3 \frac{\text{эВ}}{\text{нм}^2 \cdot \text{с}}$, что на несколько порядков больше мощности выделяющейся при поглощении света.

Сравнивая значение средней мощности света из области основного поглощения, падающего на поверхность мишени составляющее $\approx 10^2 \frac{\text{эВ}}{\text{нм}^2 \cdot \text{с}}$ с мощностью,

приносимой ионным пучком $15 \div 15 \cdot 10^3 \frac{\text{эВ}}{\text{нм}^2 \cdot \text{с}}$, можно заключить, что они. А

согласно рассматриваемой модели, в накачку узкозонной фазы переходит только примерно 0,001 часть энергии падающего света.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 11-08-00529-а.

1. A.G. Rokakh, A.A. Serdobintsev, S.V. Stetsyura, A.G. Zhukov, M.D. Matasov, I.V. Malyar. Optical Control of Ion Sputtering // Handbook on Mass Spectrometry: Instrumentation, Data and Analysis, and Applications / Ed. by J. K. Lang. – Nova Science Publishers, 2009, pp.325-344.

2. А.Г. Роках, М.Д. Матасов. Парадоксы фотопроводящей мишени и оптическое управление выходом вторичных ионов. // ФТП, 2010, т 44, в 1, С 101-108

3. Адирович Э. И. Некоторые вопросы теории люминесценции кристаллов. - Москва : ГИТТЛ, 1956.

4. А.Г. Роках, М.Д. Матасов, А.Г. Жуков. Спектральное управление вторично- ионным фотоэффектом - путь к оптоэлектронике // Российские нанотехнологии. – 2010. Т. 5, в. 5-6, С. 69-74.

У13 Модифицированный проекционный метод наименьших квадратов решения задач диффузии неосновных носителей заряда в полупроводниковом материале

¹Сергина Е.В., ¹Степович М.А., ²Макаренков А.М.

¹*Калужский государственный университет, Россия*

²*Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия*

Распределение по глубине неравновесных неосновных носителей заряда (ННЗ), генерированных в полупроводниковом фотоприемнике внешним источником света, является одним из важных параметров, определяющих работу фотоприемного устройства. Измерения таких распределений в реальных структурах могут быть сопряжены с определенными трудностями в проведении эксперимента, в то время как необходимые оценки могут быть получены и при использовании методов математического моделирования.

В настоящей работе для количественного описания процесса диффузии ННЗ в полупроводниковом материале использована классическая модель коллективного движения ННЗ [1, 2]. В этом случае решение дифференциального уравнения не выражается через элементарные функции, поэтому ранее для решения рассматриваемой задачи нами была предложена модифицированная проекционная схема, основанная на применении метода наименьших квадратов (МНК) и теории матричных операторов [3-5] для аппроксимации этой модели. Для реализации проекционного метода был выбран базис из модифицированных функций Лагерра.

Сравнительный анализ использования классического и модифицированного МНК показал, что переход к модифицированной проекционной аппроксимации дифференциального уравнения диффузии ННЗ очень прост с алгоритмической точки зрения и может осуществляться автоматически. Кроме того, затраты машинного времени на расчет распределения ННЗ по глубине для параметров, характерных для классических материалов полупроводниковой фотоэлектроники, с использованием модифицированного МНК приблизительно в три раза меньше по сравнению с применением классического МНК.

Использование нанотехнологий в полупроводниковом материаловедении стимулирует развитие методов, позволяющих проводить оценку качества материалов и структур фотоэлектроники в нанометровом диапазоне. Для рассматриваемой модели диффузии неравновесных ННЗ это может быть реализовано посредством учета влияния статистического разброса электрофизических параметров вещества. Нами проведено рассмотрение в предположении, что электрофизические параметры материалов (время жизни, коэффициент диффузии и скорость поверхностной рекомбинации ННЗ) являются случайными величинами и имеют усеченный нормальный закон распределения. Проведен анализ влияния дисперсий величин этих параметров на распределение ННЗ по глубине. Анализ показал, что статистический разброс (среднее квадратическое отклонение) до 20 процентов для времени жизни и коэффициента диффузии, а для скорости поверхностной рекомбинации ННЗ до 100 процентов не

приведет к значительному (более 15 процентов) статистическому разбросу распределения ННЗ по глубине относительно его среднего значения. Получена порядковая оценка и условие вычислительной устойчивости предложенного модифицированного проекционного МНК решения рассматриваемой задачи диффузии ННЗ.

Возможности метода иллюстрируются результатами вычислительного эксперимента, проведенного для модели диффузии ННЗ, генерируемых различными внешними энергетическими воздействиями: как световыми, так и электронными пучками в кремнии, арсениде галлия и теллуриде кадмия.

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-03-00961), а также РФФИ и правительства Калужской области (проект № 12-02-97519).

1. Wittry D.B., Kyser D.F. // J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. No. 1. P. 375.
2. Rao-Sahib T.S., Wittry D.B. // J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. No. 9. P. 3745.
3. Лапин С.В., Егунов Н.Д., Теория матричных операторов и ее приложение к задачам автоматического управления. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1997. 496 с.
4. Петров В.И., Самохвалов А.А., Степович М.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2002. Т. 66. № 9. С. 1310.
5. Серегина Е. В., Макаренков А. М., Степович М. А. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. № 8. С. 41.

У14 Об условии блокировки поверхностной рекомбинации носителей в полупроводниках приповерхностным варизонным слоем при неоднородной фотогенерации

Холоднов В.А., Другова А.А.

Институт радиотехники и электроники им.В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

Приповерхностные варизонные слои с направлением варизонных (квазиэлектрических [1]) полей, оттягивающим фотоносители от поверхности, эффективнее, нежели широкозонное “гетеро-окно”[2], препятствуют поверхностной рекомбинации. Плавность изменения мольного состава позволяет избежать рекомбинации фотоносителей на границе раздела гетероперехода в случае широкозонного “гетеро-окна”. Несмотря на солидный возраст этой идеи, нельзя признать полную ясность в условиях ее реализации. Численный анализ не позволяет, разумеется, получить сколь-нибудь общие закономерности. Аналитическое рассмотрение характеристик, в том числе, фотоэлектрических, варизонных полупроводников обычно проводится либо в модели однородной, либо в модели ступенчато однородной напряженности варизонного поля $E_{var}(x)$ [1,2]. Модель $E_{var}(x)=const$ допускает аналитическое решение, но из-за отсутствия гомогенной области не вполне адекватна предмету исследований. В модели ступенчато однородной зависимости $E_{var}(x)$ возникает вопрос об условиях сшивки решений на границах раздела варизонных слоев. При отсутствии рекомбинационных и зарядовых состояний на границах раздела можно требовать, казалось бы, непрерывность напряженности фотоэлектрического поля E_{ph} и электронного $I_{ph}^{(n)}$ и дырочного $I_{ph}^{(p)}$ фототоков. Однако, такой обычный подход математически не достаточно корректен. Дело в том, что из-за разрыва E_{var} нельзя, строго говоря, интегрировать уравнения Пуассона для

E_{ph} и непрерывности для $I_{ph}^{(n)}$ и $I_{ph}^{(p)}$ в окрестности варизонно-гомогенной границы.

Такое требование приводит к физически неприемлемым результатам. В статье [3] изложена корректная математическая модель слабого фотовозбуждения носителей в поверхностно-варизонных образцах при непрерывном изменении $E_{var}(x)$. Решение при ступенчатом профиле $E_{var}(x)$ получено за счет устремления к 0 толщины переходного слоя Δ (рис.1). В [3] фотогенерация носителей в толще образца считалась однородной. Это ограничение снято в данной работе. Показано, что при выполнении соотношения

$$\frac{L_1 + Z \cdot L_2}{L \cdot (Z - 1) + L_1 + Z \cdot L_2} \ll 1 + (\gamma \cdot L)^{-1}$$

фоточувствительность образца практически не зависит от рекомбинационного состояния поверхности, где $L_{1,2}=(l \pm d)/2$, $l = \sqrt{d^2 + 4L^2}$, $Z = \exp(l \cdot W/L^2)$, d - дрейфовая длина неосновных носителей в варизонном поле, L - их диффузионная длина, W -толщина варизонного слоя при $\Delta=0$, γ -коэффициент поглощения света/

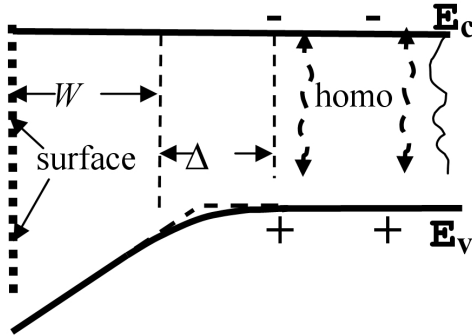


Рис. 1

Зависимость отношения R полного числа фотоносителей в гомогенной (homo) области при $\Delta=0$ к полному числу фотоносителей в гомогенном образце с идеальной поверхностью от $\gamma \cdot L$ см. на рис.2.

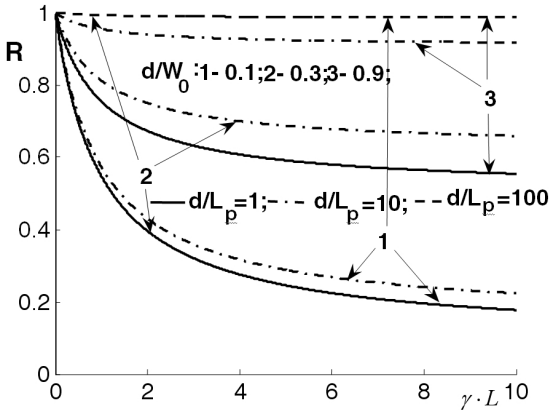


Рис. 2

Литература

[1] Кремер. УФН, т. 172, в. 9, с. 1087- 1101, 2002.

[2] Ж.И. Алфёров. УФН, т. 172, в. 9, с. 1068- 1086, 2002.

[3] В.А. Холоднов. Письма в ЖТФ, т. 36, в. 20, с. 1–9, 2010.

У15 Сканирующие матричные ИК преобразователи и их автокалибровка. Исторические аспекты и перспективы

Курбанов К.Р., ¹Сапцин В.М., ²Вороная И.В.

Кременчугский институт Днепрпетровского университета, Украина

¹Кременчугский национальный университет, Украина

²Витебский государственный технологический колледж, Беларусь

В современном мире, в связи с экспоненциально возрастающим потоком информации, все большую роль начинают играть параллельные технологии ее регистрации, преобразования и обработки, основанные на использовании матричных фотоприемных устройств (МФПУ), от ультрафиолетового и видимого до ИК-диапазонов [1].

Основным материалом для создания охлаждаемых ИК-матриц, позволяющих в диапазоне длин волн 5-20 мкм достигнуть чувствительности, ограниченной квантовыми флуктуациями интенсивности регистрируемого излучения, являются твердые растворы кадмия-ртути-теллура (КРТ). Разработаны МФПУ с числом фотоприемных элементов (ФПЭ) до $4 \cdot 10^6$ при минимальных размерах ФПЭ до 15×15 мкм², сравнимых с длиной волны, что в принципе позволяет получать ИК-изображения, по качеству близкие к видеоизображениям.

В то же время проблемы, связанные с однородностью и стабильностью КРТ, которые обеспечивают идентичность параметров ФПЭ на микроуровне, остаются до конца не решенными, что приводит к существенному ограничению качества ИК-изображения (остаточный геометрический шум). Эти проблемы, как показывает многолетний опыт работы одного из авторов над разработкой технологии и совершенствованием КРТ в рамках спецтема еще в советские годы, обусловлены его физико-химической природой [2], и одними только технологическими средствами в обозримом будущем они вряд ли будут решены.

В 80-е годы прошлого столетия один из авторов настоящего сообщения, занимаясь в Куйбышевском филиале ФИАН разработкой и приложениями методов теплового контроля на базе измерительно-вычислительного комплекса с использованием сканирующего многоэлементного тепловизора «Радуга-МТ» (фотодиодная линейка на основе InSb), столкнулся с проблемой наличия остаточного геометрического шума на регистрируемых ИК-изображениях, обусловленного нестабильностью ФПЭ, которую удалось решить применением специально разработанного цифрового алгоритма [3].

Понимая фундаментальный характер проблемы, автор попытался обобщить идею использования двумерного сканирования и цифровой обработки для полного подавления геометрических шумов матричного ИК-преобразователя непосредственно по сигналам сцены, без применения эталонных излучателей [4]. Была впервые теоретически обоснована возможность достижения в таком МФПУ уровня остаточного геометрического шума, сравнимого с предельной чувствительностью одиночного ФПЭ. В предложенном комплексе алгоритмических процедур был учтен тот факт, что задача безэталонной калибровки имеет двойственный характер: регистрируемая сцена служит

тестовым объектом для идентификации параметров ФПЭ матрицы, а матрица – тестовым объектом для идентификации неискаженного изображения сцены. В начале 90-х годов идеи и результаты теоретической работы [4] были доложены на научном семинаре проф. В.И. Стафеева (НПО «Орион») и подтверждены компьютерным и натурным моделированием [5,6].

После периода «застоя», кризисного для развития науки на всем постсоветском пространстве, в начале нынешнего тысячелетия интерес к идее безэталонной калибровки матричных преобразователей возобновился, о чем свидетельствует ряд новых работ в этом направлении [7-10], в том числе проводимых и ФГУП «НПО «Орион» [9]. Этому в значительной степени способствовали как прогресс в производстве матриц ФПЭ, так и миниатюризация и повышение производительности компьютерной техники, включая развитие параллельных технологий.

Идея двумерного, а в общем случае - многомерного сканирования системы датчиков относительно источников регистрируемых сигналов имеет много аналогов в живой природе [11] и может служить основой для разработки адаптивных безэталонных методов взаимной пространственной идентификации любых взаимодействующих систем, допускающих соответствующую пространственную дискретизацию и смещения. Дальнейшее развитие метода может быть связано с расширением сферы его применений, с разработкой автокалибровки существенно нелинейной (не сводимой к линейной никаким выбором шкалы) системы датчиков, с рассмотрением как двумерных, так и существенно многомерных случаев на нетривиальных геометрических многообразиях. Весьма перспективным может оказаться использование разбиений n -мерного пространства на примитивные регулярные параллелепипеды, впервые предложенных известным украинским математиком Г.Ф. Вороным еще в начале прошлого столетия [12].

В предлагаемой работе подробно рассматриваются и анализируются все затронутые выше аспекты проблемы безэталонной автокалибровки сканирующих матричных преобразователей сигналов и изображений, их история, современное состояние и перспективы дальнейшего развития.

Литература

1.Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Современное состояние и магистральные направления развития современной фотоэлектроники. – М.: Физматкнига, 2010. - 128 с.

2.Курбанов К.Р., Гаврилюк Ю.Н. Организация промышленного производства монокристаллических пластин $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x=0,2; 0,3$ и $0,5$) в СССР. - XXI Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. 25-27 мая 2010. Москва, Россия. - М.: ФГУП «НПО «Орион», 2010. - С. 24-25.

3.Адаптивная автокалибровка многоэлементного приемника в тепловизорах серии «Радуга» / В.М. Сапцин, В.В. Великосельский, А.Г. Гончаров и др. - Тепловидение. – М.: Изд-во МИРЭА, 1988. - С. 47-54.

4.Сапцин В.М. К проблеме выравнивания фоточувствительности приемных элементов в тепловизорах с многоэлементными матричными ИК-фотопреобразователями. - М.: ФИАН, 1989. – 35 с. (Препринт Физического института им. П.Н.Лебедева АН СССР, №72).

5.Kober V.I., Sapsin V.M., Vavilov V.P. New method of digital modulative adaptive autocalibration of IR-imaging devices. - Eurotherm Seminar № 27 QIRT'92 (Chatenay-Malabry, Franes, July 7-9, 1992). – Paris: EETI ed., 1992. P. 3–7.

6.Сапцин В.М., Ганжа В.Л. Численное моделирование и оптимизация модуляционной автокалибровки матричных ИК-преобразователей. - Мн.: АНК «ИТМО

им. А.В.Лыкова» АНБ, 1993. – 48 с. (Препринт АНК «ИТМО им. А.В.Лыкова» АНБ, № 4).

7. Сапцин В.М., Ляшенко В.П. Математическая модель и алгоритм для дискретного преобразования изображений. - Вестник Херсонского национального технического университета. – 2006. - Вып. 2(25). – С. 443–448.

8. Лебедев Д.Г., Лыонг К.Т. Моделирование адаптивного выравнивания параметров линейки фотоприемников с использованием микросканирования. - Информационные процессы. – 2007. – Т. 7., № 2. – С. 124-137.

9. Метод коррекции неоднородности многоэлементных фотоприемных устройств по сигналам сцены / В.Н. Соляков, С.И. Жегалов, Л.Д. Сагинов и др. - Прикладная физика. – 2008. - № 1. - С. 60-70.

10. Сапцин В.М., Ольховая Ю.А., Глебов А.А. К проблеме подавления геометрических шумов. Алгоритм пространственной регуляризации неравномерно расположенных фотоприемных элементов матрицы. - Математичні машини і системи. – 2011. - № 2. – С. 143–152.

11. Ярбус А.Л. Роль движений глаз в зрении. – М.: Наука, 1965. – 250 с.

12. Вороной Г.Ф. Исследования о примитивных параллелоэдрах. Собрание сочинений, т. 2, Киев, изд-во Академии Наук Украинской ССР, 1952. - С. 239 – 368.

У16 AlGaAs/GaAs гетероструктуры с квантовыми ямами для широкоформатных матриц, работающих в спектральной области 8÷10 мкм

¹Дудин А.Л., ¹Кацавец Н.И., ¹Кокин А.В., ¹Красовицкий Д.М., ²Куликов В.Б., ¹Чалый В.П.

¹ ЗАО «Светлана-Рост», Санкт-Петербург, Россия

² ОАО «ЦНИИ «Циклон», Москва, Россия

Настоящая работа посвящена результатам разработки конструкции и технологии выращивания AlGaAs/GaAs гетероструктур (ГС) с квантовыми ямами (КЯ), предназначенными для широкоформатных матриц тепловизионных систем, так называемых QWIP (quantum well infrared photodetector) матриц, работающих в спектральной области прозрачности атмосферы 8÷10 мкм. ГС выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке STE-3532 (производитель «SemiTEq», С.Петербург, Россия), предназначенной для роста соединений типа A_3B_5 на подложках диаметром до 4 дюймов включительно. Для улучшения однородности выращиваемых слоев установка снабжается источниками повышенной «конусности», позволяющими формировать в плоскости образца однородные потоки компонентов. Благодаря такой конструкции источников на структуре диаметром 4 дюйма получена неоднородность толщины слоев порядка $\pm 1\%$.

Выращиваемые КЯ ГС содержали: 1) буферный специально-нелегированный слой толщиной 0,8 мкм; 2) нижний контактный слой толщиной 1,0 мкм с уровнем легирования $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 3) массив КЯ, состоящий из пятидесяти GaAs КЯ, толщиной 5 нм с уровнем легирования $9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и специально-нелегированных $\text{Al}_{0,27}\text{Ga}_{0,73}\text{As}$ барьеров толщиной 45 нм; 4) верхний контактный слой толщиной 1,0 мкм с уровнем легирования $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. В качестве легирующей примеси использовался кремний (Si), приводящий к n-типу проводимости.

КЯ ГС выращивались на полуизолирующих GaAs подложках ориентацией /100/ диаметром три дюйма. Выращенные КЯ ГС исследовались методами измерения спектров фотолуминесценции и оптического поглощения. Результаты исследования подтверждают высокую степень однородности выращенных слоев по составу и толщине.

На выращенных ГС были отработаны «постростовые» операции по изготовлению широкоформатных QWIP матриц. В качестве тестового элемента была выбрана матрица форматом 320x256 элементов с шагом 30 мкм.

«Постростовые» операции включали в себя следующие технологические процессы:

- разделение элементов путем «глубокого» (порядка 3÷5 мкм) травления и пассивация поверхности боковых стенок (в качестве пассивирующего диэлектрика использовался SiNx);
- формирование контакта к нижнему слою с помощью «полового» травления и металлизации;
- формирование дифракционной решетки оптимальной конструкции на поверхности ГС.

На рис.1 и 2 представлены фотографии «глубокого» (ширина канавки 2 мкм, глубина 5 мкм) и «полового» (угол наклона стенки 70⁰) травления, сделанные с помощью растрового электронного микроскопа. Процесс травления гетероструктуры и пассивации поверхности реализован на установках Corial 200IL и Plasmalab 80Plus, соответственно.



Рис. 1

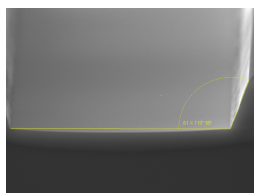


Рис. 2

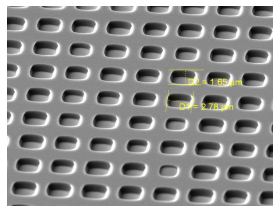


Рис. 3

На рис.3 представлена дифракционная решетка, сформированная на поверхности ГС с глубиной равной четверти длины волны максимума фоточувствительности, деленной на показатель преломления.

На основе выращенных ГС и постростовой технологии были изготовлены тестовые фотоприемники и QWIP матрицы, смонтированные на кремниевый мультиплексор. Результаты измерения их электрофизических характеристик (плотности темнового тока в зависимости от приложенного электрического напряжения и типичный спектр фоточувствительности) представлены на рис.4. и 5, соответственно.

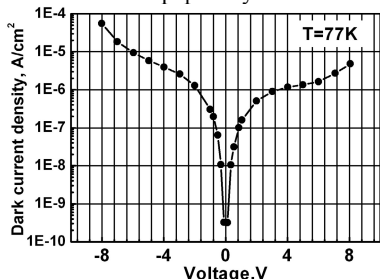


Рис.4

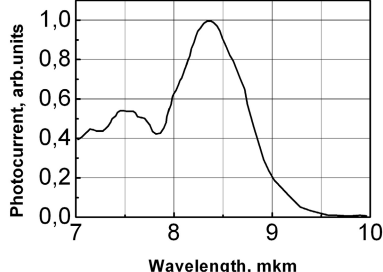


Рис.5

Таким образом, на отечественной установке молекулярно-пучковой эпитаксии разработан технологический режим роста AlGaAs/GaAs КЯ ГС диаметром до 4 дюймов с высокой степенью однородности по составу и толщине, позволяющих изготавливать на их основе широкоформатные тепловизионные QWIP матрицы, фоточувствительные в длинноволновом ИК диапазоне. Разработаны постростовые технологические процессы изготовления таких матриц. Изготовлена гибридная фоточувствительная схема, состоящая из QWIP матрицы и кремниевого мультиплексора.

У17 МОС-гидридная эпитаксия для полупроводниковой фотоэлектроники УФ-диапазона

Мармалюк А.А., Мазалов А.В., Курешов В.А., Сабитов Д.Р., Падалица А.А.

ФГУП НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, Москва, Россия

Одним из привлекательных направлений развития современной полупроводниковой фотоэлектроники является создание фотоприемных устройств УФ диапазона, в особенности чувствительных в солнечно-слепом спектральном диапазоне. Интерес к последнему вызван тем фактом, что фоновое излучение в этой спектральной области практически полностью отсутствует из-за поглощения излучения Солнца и других звёзд озоновым слоем Земли и поглощения излучения искусственных осветительных приборов их стеклянными оболочками. Среди возможных материалов, обеспечивающих чувствительность в рассматриваемом диапазоне, в последнее время все активнее исследуются широкозонные полупроводники AlN, GaN и твердые растворы на их основе.

В данной работе рассмотрена применимость МОС-гидридной эпитаксии в качестве метода формирования нитридных эпитаксиальных гетероструктур фотоэлектронного назначения. Большая гибкость в выборе исходных материалов, широкий диапазон варьирования параметров роста, возможность проведения *in situ* контроля процесса роста в реальном времени, хорошая масштабируемость процесса роста для увеличения количества одновременно обрабатываемых пластин, снижение себестоимости единицы продукции делают этот метод привлекательным для создания гетероструктур с перспективой промышленного освоения.

Рассмотрены особенности процесса получения AlN и AlGaN на подложках сапфира в условиях МОС-гидридной эпитаксии. Сильное несоответствие параметров решеток GaN и Al₂O₃ не позволяет выращивать нитрид галлия высокого кристаллического совершенства непосредственно на сапфировой подложке. Для решения этой задачи обычно используют промежуточные буферные (зародышевые) слои. В нашем случае использовался буферный слой AlN, так как ширина запрещенной зоны AlN (6,2 эВ) больше, чем ширина запрещенной зоны GaN (3,4 эВ) и, соответственно, при работе фотоприемника «на просвет» промежуточный слой AlN прозрачен для УФ-излучения. Это является необходимым условием работы рассматриваемых приборов.

Представлены результаты оптимизации процесса роста гетероструктур GaN/AlN для фотоэммитеров с отрицательным электронным сродством. Предложены подходы по повышению качества материала с учетом специфики приборного применения. В частности, характерной особенностью таких гетероструктур является необходимость получения высококачественного слоя GaN толщиной порядка 100-200 нм из-за высокого коэффициента поглощения света в данном материале. Это является непростой задачей, т.к. кристаллическое совершенство зависит от толщины слоя. Например, в

гетероструктурах для светодиодов толщина буферного слоя GaN составляет 1-3 мкм. Выполненные исследования показали, что структурное совершенство тонких слоев GaN напрямую зависит от толщины буферного слоя AlN. В результате проведенных экспериментов была подобрана оптимальная толщина буферного слоя AlN, при котором активный слой обладает наилучшим кристаллическим совершенством.

Для работы прибора необходимо обеспечить достаточно высокую концентрацию носителей заряда р-типа проводимости в активном слое GaN. Оптимизация условий легирования и высокотемпературного отжига позволила получить слои GaN р-типа проводимости, с концентрацией носителей заряда порядка $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Показано влияние параметров гетероструктур на выходные приборные характеристики. Установлена взаимосвязь между квантовой эффективностью работы прибора и полушириной рентгеновской кривой качания активного слоя GaN.

Изучены вопросы получения гетероструктур GaN/AlGaIn для *p-i-n* фотодиодов и диодов с барьером Шоттки УФ спектрального диапазона. Проведена оптимизация условий роста буферного слоя AlN. Так, путем подбора расходов TMAI, NH₃, отношения элементов V/III и общего потока газовой смеси, были получены буферные слои AlN, толщиной 0,6 мкм, с полушириной рентгеновской кривой качания равной 130 угловых секунд. Среднеквадратическая шероховатость (rms) такого слоя равнялась 0,66 нм. Используя этот буферный слой, удалось получить высококачественную приборную структуру для *p-i-n* фотодиода удовлетворяющую всем необходимым требованиям по толщинам слоев, уровню легирования, подвижности и концентрации носителей заряда.

У18 Рост и характеристика легированных слоев AlGaIn, полученных методом МЛЭ из аммиака

¹Журавлёв К.С., ¹Малин Т.В., ¹Александров И.А., ¹Протасов Д.Ю., ¹Свиташева С.Н.,
²Давыдов В.Ю., ²Смирнов А.Н., ²Кютт Р.Н., ³Dobos L., ³Pecz B.

¹ *Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия*

² *ФТИ им. А.Ф.Иодффе, Санкт Петербург, Россия*

³ *Institute for Technical Physics and Materials Science, Research Centre for Natural Sciences, Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Hungary*

В настоящее время наилучшими кандидатами для коротковолновых оптоэлектронных приборов считаются нитрид галлиевые *p-i-n* фотодиоды, освещаемые через сапфировую подложку, прозрачную в УФ области спектра. Такие *p-i-n* фотодиоды изготавливаются на основе многослойных AlGaIn гетероструктур с модулированным составом и модулированным легированием. В данном сообщении приведены результаты исследования легированных слоев AlGaIn различного состава.

Гетероструктуры GaN/AlGaIn выращивались методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках сапфира с ориентацией (0001). После нитридации подложки выращивался буферный слой, состоящий из слоя AlN и короткопериодной сверхрешетки AlN/GaN, на котором растился слой AlGaIn толщиной около 1,0 мкм. Молярная доля AlN в слоях Al_xGa_{1-x}N варьировалась и составляла $x=0, 0.3, 0.6$. Состав слоев контролировался с помощью рентгеновской дифракции (РД), оптического пропускания, эллипсометрии, люминесценции, комбинационного рассеяния света (КРС). Поскольку в аммиачной МЛЭ кремний покрывается пленкой Si₃N₄, что неконтролируемым образом изменяет поток легирующей примеси, то в

данной работе для получения слоев электронной проводимости использовался моносилан.

С увеличением потока SiH_4 концентрация электронов в слоях GaN линейно возрастала до $n=1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, а подвижность электронов монотонно уменьшалась до $\mu=120 \text{ см}^2/\text{В сек}$. Очень близкие значения концентрации электронов были получены из сдвига фонон-плазмонной связанной моды в спектрах КРС. В слоях $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$ и $\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{N}$ концентрация электронов достигала $n=4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и $n=2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при подвижности $\mu=60 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и $\mu=15 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, соответственно. Отметим, что концентрация электронов в слоях $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$ насыщалась, а в слоях $\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{N}$ падала после достижения максимального значения. В спектрах эллипсометрии и оптического пропускания сильно легированных слоев отчетливо наблюдался сдвиг Бурштейна-Мосса, кроме того появилась дополнительная ступенька вблизи края собственного поглощения. При этом энергетическое положение полосы краевой люминесценции слоев GaN и AlGaN практически не зависело от концентрации легирующей примеси. Интенсивность краевой люминесценции слоев GaN линейно возрастала с повышением уровня легирования, достигая максимального значения вблизи $n=8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, затем резко падала. Аналогичные данные были получены для слоев AlGaN с $x_{\text{Al}}=0,3$ и $0,6$, в этих слоях, однако падение интенсивности начинается при меньших концентрациях электронов. Рост интенсивности ФЛ свидетельствует о повышении вероятности излучательной рекомбинации, а падение интенсивности люминесценции говорит о введении большой концентрации дополнительных центров безызлучательной рекомбинации при сильном легировании. В спектрах люминесценции $\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{N}$ помимо краевой полосы наблюдалась «зеленая» полоса, интенсивность которой растет с увеличением потока SiH_4 . Важно отметить, что рост интенсивности ФЛ происходит, несмотря на более, чем двухкратное увеличение ширины на полувысоте (ПШПВ) двухкристалльных пиков для симметричного отражения (0002) и асимметричного (10-15), снятых в двух геометриях – компланарной со скользящим падением и симметричной наклонной геометрии. Для всех образцов ширина рефлекса (10-15) меньше в геометрии скользящего падения, чем в наклонной примерно в 2-2,5 раза. Это указывает на преобладающую долю прорастающих прямолинейных дислокаций. Увеличение ширины (0002)-отражения указывает на аналогичное изменение плотности винтовых прорастающих дислокаций. Данные просвечивающей электронной микроскопии согласуются с этими результатами и показывают, что плотность дислокаций слабо меняется с толщиной исследуемых слоев.

У19 Фоточувствительные МДП-структуры со сверхтонким плазменным окислом на InAs

Кеслер В.Г., Гузев А.А., Ковчавцев А.П., Курышев Г.Л., Царенко А.В., Панова З.В.

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

Использование матричных ИК-фотоприёмников на InAs [1] с термоэлектрическим охлаждением требует повышения рабочей температуры с 77К до 150К и выше. Основным препятствием повышения температуры являются развивающиеся при этом гистерезисные явления (накопление в МДП-структуре паразитных зарядов с увеличением напряжённости электрического поля), приводящие к нестабильности рабочих напряжений прибора. С целью повышения качества МДП-структур нами начаты исследования по окислению InAs в плазме тлеющего разряда [2].

В настоящей работе представлены результаты пассивации поверхности InAs сверхтонким плазменным окислом (~3нм), полученным в высоковакуумной камере SSC Riber. Изучались вольт-амперные характеристики и адмиттанс ($C-V$, $G-V$ характеристики) МДП-структур InAs-окисел-Au. Впервые для МДП-структур на основе InAs при температуре жидкого азота наблюдались *безгистерезисные* зависимости ёмкости от смещения в широком диапазоне полей: от $-5 \cdot 10^6$ до $+3,3 \cdot 10^6$ В/см. Граница раздела собственный оксид/InAs характеризуется низкой плотностью поверхностных состояний $\leq 10^{10}$ см⁻²эВ⁻¹ (рис.1). С ростом температуры появляется гистерезис, при 150 К он составил 0,044 В, при 200 К – 0,11 В, что является приемлемым для создания ФПУ.

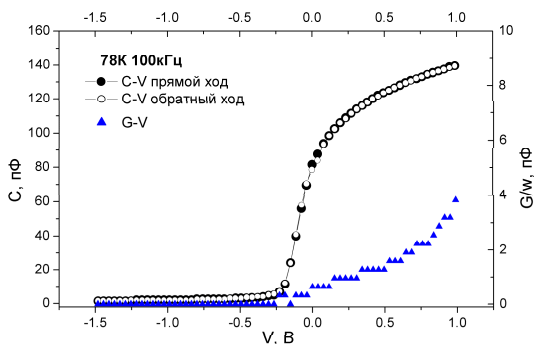


Рис 1. C-V, G-V характеристики структуры InAs-плазменный окисел-Au

Экспериментальные зависимости $C(V_g)$ МДП-структур со сверхтонким диэлектриком (~3 нм) при обогащающих потенциалах ($V_g > 0$) существенно отличаются от классических зависимостей на структурах с более толстым диэлектриком (>20нм). Показано, что расчёт $C(V_g)$ с учётом квантования, фермиевской статистики и непароболличности зон хорошо описывает особенности экспериментальных зависимостей $C(V_g)$. Структура является

удобным объектом для моделирования квантовых явлений в приповерхностных слоях полупроводника. Для создания ФПУ на МДП с неравновесным обеднением необходим дополнительный защитный диэлектрический слой толщиной от 30 до 100 нм.

Полученные МДП-структуры с туннельно тонким диэлектриком подобны структурам с барьером Шотки и обладают ИК-фоточувствительностью в токовом режиме (рис.2).

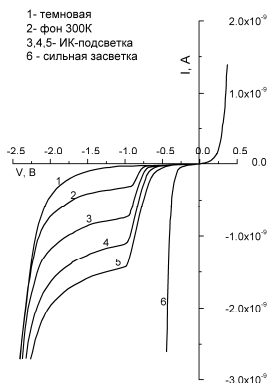


Рис 2. ВАХ структуры InAs-плазменный окисел-Au

Величина темнового тока позволяет получить обнаружительную способность при температуре ~80 К не хуже 10^{12} см⁻²Гц^{1/2}·Вт⁻¹. Обсуждается возможность защиты

создаваемых МДП-структур дополнительным диэлектрическим слоем Al_2O_3 , получаемым вакуумным напылением в единой установке.

Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ проект 11-07-12067.

[1] В.Н.Овсюк, Г.Л.Курышев и др. Матричные фотоприёмные устройства инфракрасного диапазона. Н-ск: Наука, 2001.

[2] Кеслер В.Г., Ковчавцев А.П., Гузев А.А., Панова З.В., Курышев Г.Л.. Анодное окисление арсенида индия в кислородной плазме тлеющего разряда // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2010, том 7, № 4., С. 82-88

У20 Модернизация и производство многоэлементных фотоприемных устройств на основе селенида свинца

Степанушкин А.Г., Годованок В.Н., Шевчук В.В., ¹Бабий А.Г., ¹Крушельницкий О.А., ¹Филипов Н.Ф.

*ОАО «ЦКБ Ритм», Черновцы, Украина
¹ОДО «Завод Кварц», Черновцы, Украина*

Описывается комплекс работ, выполненных авторами по модернизации 14-элементного фотоприемного устройства ФУЛ-123 на основе селенида свинца. Приведены результаты, полученные при промышленном производстве данных фотоприемных устройств (ФПУ), проанализирован достигнутый уровень по фотоэлектрическим параметрам и надежности изделий.

Изделие ФУЛ-123 выпускалось заводом «Кварц» в 1982-1991 гг., причем на тот момент по фотоэлектрическим параметрам оно соответствовало лучшим мировым образцам. Однако в связи с развитием оптоэлектроники и повышением требований к ФПУ такого класса весьма актуальной стала необходимость модернизации.

Она проводилась по нескольким направлениям:

- комплекс работ по модернизации процессов осаждения слоя PbSe на подложку с последующим отжигом для достижения высокой однородности по площади подложки и получения структур, оптимизированных на рабочую температуру изделия;
- разработка нового 3-х каскадного термоэлектрического охладителя (ТЭО) в прежних габаритах вместо используемого ранее 2-х каскадного ТЭО, что позволило получить увеличение перепада температур на 10-15°C;
- оптимизация механической стыковки фоторезистора (ФР) и блока усилителей за счет перераспределения масс отдельных узлов для повышения виброустойчивости изделия;
- разработка мер по обеспечению чистоты внутреннего объема изделия и введение дополнительных технологических операций, позволяющих улучшить герметичность изделий;
- модернизация электронной платы блока усилителей при неизменной электрической схеме. Замена трудоемкого и нестабильного процесса получения резистивных элементов на плате путем напыления высокоомного резистивного сплава на приклейку дискретных навесных резисторов для поверхностного монтажа SMD. Применение высокоточных и высокостабильных SMD-резисторов позволило стабилизировать коэффициенты усиления каналов и свести к минимуму разброс вольтовой чувствительности между каналами и изделия в целом за счет более точного набора нагрузочных резисторов из стандартного ряда.

После проведения вышеуказанных работ по модернизации было изготовлено более 50 штук изделий, получены следующие результаты:

- средний уровень $D_{\lambda_{\max}}^* = (1,2-3,0) \cdot 10^{10} \text{ см}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}$ при рабочей температуре $293 \pm 2 \text{ К}$;

- разброс по вольтовой чувствительности $\Delta S_v = 10-30\%$;

- изделия успешно выдерживают испытания на виброустойчивость, воздействие термоциклов, испытания на холодо- и теплоустойчивость.

У21 Формирование поверхностных периодических структур в гетероэпитаксиальных слоях $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ при воздействии мощного импульсного лазерного ИК излучения

Войцеховский А.В., ¹Средин В.Г., ¹Талипов Н.Х.

Сибирский физико-технический институт ТГУ, Томск, Россия

¹ Военная академия РВСН им. Петра Великого, Москва, Россия

Воздействие мощного импульсного лазерного излучения приводит к возникновению в полупроводниках ряда нелинейных эффектов, связанных с образованием электронно-дырочной плазмы, генерацией акустических волн, поверхностному плавлению и разрушению материалов, многофотонному поглощению, а также нелинейным явлениям [1-4]. Мощное импульсное ИК-излучение, широко используется для засветки ИК-фотоприемников на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ). Поэтому представляет особый интерес исследование оптической стойкости гетероэпитаксиальных структур КРТ, выращенных методом МЛЭ (ГЭС КРТ МЛЭ) при воздействии лазерного ИК-излучения. В работе представлены результаты исследования модификации поверхности ГЭС КРТ МЛЭ после воздействия мощного импульсного ИК-излучения твердотельного $\text{YAG}/\text{Nd}^{3+}$ и химического DF лазеров.

Для экспериментов использовались структуры ГЭС КРТ МЛЭ, выращенные в ИПФ СО РАН (г. Новосибирск) на подложках GaAs. Образцы в рабочем слое имели состав $x=0,209-0,220$, а в верхнем варизонном слое – $x_s=0,45-1,0$. Структуры со стороны слоя КРТ были облучены при комнатной температуре мощными одиночными импульсами $\text{YAG}/\text{Nd}^{3+}$ лазера на длине волны 1,06 мкм и DF лазера, излучающего в интервале длин волн 3,8–4,2 мкм. Длительность импульса $\text{YAG}/\text{Nd}^{3+}$ лазера составляла 11, 15 и 25 нс, плотность мощности излучения в импульсе – от 1,5 до 20 МВт/см². У DF лазера плотность мощности импульсов варьировалась в интервале 1,35–10,2 МВт/см² при длительности 2 мкс. Исследования проводились на оптическом цифровом микроскопе фирмы “Nikon”, профилометре “Dektak-8”, оптическом профилометре “Woko NT 9100 Surface profiler” фирмы Veeco Instr. Inc.

Энергия кванта излучения $\text{YAG}/\text{Nd}^{3+}$ лазера (1,17 эВ) и DF лазера (0,29–0,33 эВ) больше ширины запрещенной зоны фоточувствительного материала КРТ, поэтому оно поглощается в верхнем приповерхностном слое толщиной не более 0,3 мкм для неодимового лазера и не более 1 мкм для фтор-дейтериевого лазера. Уже при относительно малых значениях плотности мощности температура в поверхностном поглощающем слое КРТ достигает температуры плавления, что определяет как структурное изменение поверхностного слоя, так и его оптические характеристики.

На рис. 1,а показана типичная профилограмма, полученная в серии экспериментов на облученных $\text{YAG}/\text{Nd}^{3+}$ лазером структурах. В данном эксперименте левая часть образца была диафрагмирована от действия лазерного излучения. Как видно, в облученной части произошла возгонка материала на глубину порядка 0,1 мкм, причем на границе облученной-необлученной частей возникает барьер из

рекристаллизованного материала высотой около 0,2 мкм. Из рис. 1,б видно, что в переплавленной области вблизи ступеньки после рекристаллизации образовалась поверхностная периодическая структура (ППС). Период ППС составляет ~0,3 мкм и он хорошо коррелирует с длиной волны ($\lambda/n_{\text{КРТ}}$) неодимового лазера в КРТ. Аналогичная ППС структура наблюдается и при облучении ГЭС КРТ МЛЭ мощными импульсами DF лазера (рис. 2). Высота ступеньки на рис. 2,а, образовавшаяся за счет испарения материала, составляет 4-5 мкм. И в этом случае период ППС (рис. 2,б) равен ~1,3 мкм, что также коррелирует с длиной волны DF лазера в КРТ. Эти корреляции свидетельствуют о наличии интерференции падающей и отраженной волн лазерного излучения от фазовой границы “расплав-кристалл” в приповерхностном расплавленном слое ГЭС КРТ МЛЭ за время импульса с формированием волнообразного температурного поля.

Образование ППС при импульсной лазерной обработке структур $\text{SiO}_2\text{-Si}$ описывается в [1]. В работе [3] образование ППС после импульсного лазерного облучения полупроводников и металлов объясняется процессами резонансного возбуждения поверхностных электромагнитных волн, интерференция которых с падающей волной приводит к пространственной модуляции энерговыделения. В наших экспериментах ППС образуется на границе между облученной и необлученной части структуры (видно затухание волн вдали от границы). Это, по-видимому, связано с быстрым латеральным стоком тепла из расплава в замаскированную необлученную область и вблизи нее рекристаллизация облученного материала происходит гораздо быстрее, чем в остальной более дальней части. В результате этого вблизи границы формируется клин, толщина которого больше для излучения DF-лазера. Возникает интерференция на клине падающей и отраженных волн. В более дальней от границы области расплав существует дольше и происходит размытие интерференционной картины. Подтверждением этому служат, на наш взгляд, нижние снимки на рис. 2,б,в, где хорошо видны террасообразные кольца на клинообразном выступе в рекристаллизованном ГЭС КРТ МЛЭ.

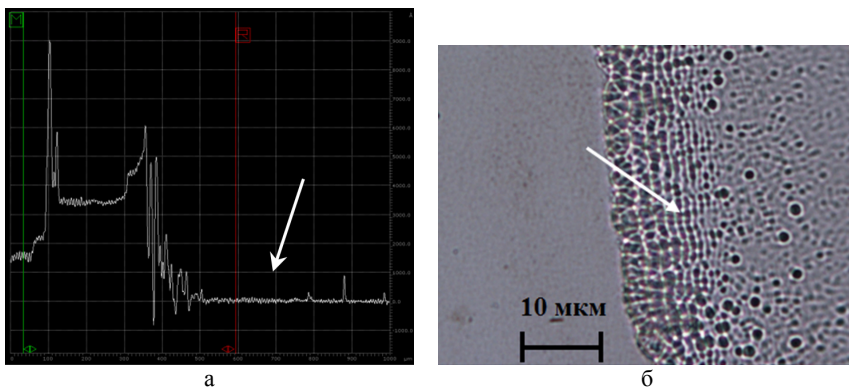


Рис.1. Поверхность ГЭС КРТ МЛЭ, облученная импульсами YAG/Nd^{3+} лазера с плотностью мощности 5,6 МВт/см²: а - профилограмма, измеренная на профилометре “Dektak-8”, б - изображение, полученное в оптическом цифровом микроскопе “Nikon”. Стрелками показана облученная часть структуры.

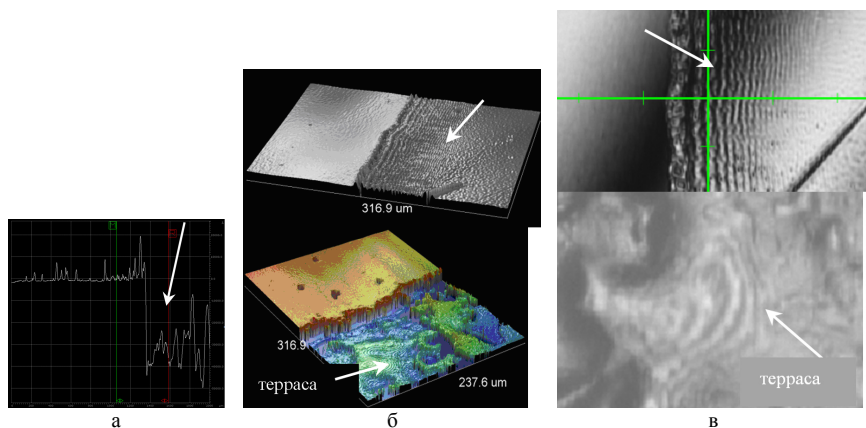


Рис.2. Изображение поверхности ГЭС КРТ МЛЭ, облученной импульсами DF лазера с плотностью мощности 10,2 МВт/см². Измерения проводились на: а – профилометре “Dektak-8”; б, в – оптическом профилометре “Woko NT 9100 Surface profiler”. Стрелками показана облученная часть структуры. Верхние и нижние рисунки б и в соответствуют одинаковым областям.

Литература

1. А.В. Двуреченский, Г.А. Качурин, Е.В. Нидаев, Л.С. Смирнов. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. – М.: Наука, 1982. – 208 с.
2. В.Г. Средин, В.М. Укроженко / Нелинейное поглощение света в $Cd_xHg_{1-x}Te$. // ФТП, т. 23, № 10, 1989. - С. 1762-1766.
3. В.П. Вейко, М.Н. Либенсон, Г.Г. Червяков, Е.Б. Яковлев. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика./ Под ред. В.И. Конова.– М.: Физматлит, 2008. – 312 с.
4. А.В. Войцеховский, С.А. Шульга, В.Г. Средин, Н.Х. Талипов / Модельное представление пропускания мощного импульсного лазерного ИК излучения в области фундаментального поглощения в эпитаксиальных слоях $Cd_xHg_{1-x}Te$ // Известия ВУЗов. Физика, 2010, № 9, с. 60-64.

У22 Выращивание эпитаксиальных слоев $CdHgTe$ на подложках $GaAs$ химическим осаждением из паров МОС и ртути

Чилясов А.В., Моисеев А.Н., Степанов Б.С., Савлинов К.Е., Попов О.А., Котков А.П., Гришнова Н.Д.

Институт химии высокочистых веществ РАН, Нижний Новгород, Россия

Твердые растворы теллуридов кадмия-ртути $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) занимают лидирующее положение среди фоточувствительных материалов, используемых при создании приборов для регистрации инфракрасного излучения.

Современные тепловизионные и тепlopеленгационные системы круглосуточного обнаружения, распознавания, наблюдения, разведки, точного наведения и прицеливания ориентированы на использование фотоприемных устройств нового поколения, а именно на матричные фотоприемные устройства (МФПУ), которые регистрируют собственное тепловое излучение объектов, его пространственное распределение и имеют высокую информативность. МФПУ на

ближний, средний и дальний ИК-спектральные диапазоны 1-3, 3-5 и 8-12 мкм выполняются на основе фотодиодов из эпитаксиальных слоев теллурида кадмия-ртути.

В настоящей работе выращивание эпитаксиальных слоев (ЭС) теллурида кадмия-ртути осуществляли методом химического осаждения из паров металлоорганических соединений кадмия и теллура и элементарной ртути (МОСVD).

Для выращивания ЭС КРТ использовали высокочистые диметилкадмий (ДМК), диэтилтеллур (ДЭТ), диизопропилтеллур (ДиИПТ) производства ЗАО «ЭЛМА-ХИМ» и металлическую ртуть марки Р10-6.

Осаждение ЭС КРТ проводили IMP (interdiffusion multilayer process)-методом на установке с вертикальным кварцевым реактором на подложках полуизолирующего арсенида галлия диаметром 50,8 мм при общем давлении 0,2 атм. Газом-носителем служил водород, очищенный диффузией через палладиевую мембрану.

Процесс состоял из следующих стадий:

- 1) отжиг подложки в потоке водорода для удаления окисного слоя;
- 2) выращивание на подложке буферного слоя из теллурида кадмия для уменьшения рассогласования параметра решетки КРТ и GaAs, а также для предотвращения диффузии компонентов подложки в КРТ;
- 3) осаждение слоя $Cd_xHg_{1-x}Te$, заключающегося в нанесении тонких чередующихся слоев CdTe и HgTe;
- 4) нанесение пассивирующего покрытия из теллурида кадмия в едином ростовом процессе;
- 5) послеростовой отжиг для полной гомогенизации структуры и формирования слоев с заданной концентрацией и подвижностью носителей заряда.

Осаждение буферных и пассивирующих слоев CdTe (из паров ДМК и ДЭТ) и КРТ (из ДМК, ДЭТ, ДиИПТ и Hg) проводили на подложки GaAs(013) при температуре 355-370°C. Толщина буферного слоя CdTe, КРТ и пассивирующего покрытия CdTe равнялась ~3, ~10 и ~1 мкм соответственно.

Подложки из арсенида галлия (ОАО «Гиредмет») с двухсторонней полировкой имели толщину 400 мкм. Эпитаксиальные слои повторяли ориентацию подложки. Кристаллическое совершенство подложек и слоев определяли методом двухкristальной рентгеновской дифрактометрии. Полуширина кривых качания рентгеновской дифракции (FWHM) слоев составляла 2-6 угл.мин., а подложек – 35-55 угл.сек.

Управление составом эпитаксиальных слоев КРТ ($x=0,2-0,5$) осуществляли изменением длительности шага осаждения подслоя CdTe и (или) HgTe. Состав определяли по краю поглощения в ИК-спектре. Однородность состава по площади образцов составляла $\pm 0,002-0,004$.

Слои имели зеркальную поверхность. Для эпитаксиальных структур КРТ кристаллографической ориентации (013) характерным ростовым дефектом на поверхности являлись бугорки (т.н. «hillocks») с размерами от 10x25 до 30x60 мкм в зависимости от условий осаждения. Поверхностная плотность этих дефектов изменялась от 200-300 до 1500-2000 см⁻².

Основные параметры свободных носителей заряда ЭС КРТ определяли из измерений коэффициента Холла и удельного электросопротивления. Слои имели p-тип проводимости с концентрацией дырок $3 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{16}$ см⁻³ и подвижностью 250-700 см²/В·с при 77 К.

Время жизни неравновесных носителей заряда в ЭС КРТ при 77 К определяли в ФГУП «НПО «Орион» (нач. НТК К.О. Болтарь, инж. С.К. Ранцан), оно составляло 50-150 нс.

У23 *In-situ* и *ex-situ* контроль состава и толщины в наноструктурах HgCdTe

Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Ремесник В.Г.

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

Квантовые или потенциальные ямы теллурида кадмия и ртути (КРТ) рассматриваются как перспективный материал для приемников, источников инфракрасного излучения и оптоэлектронных пар. Прецизионный контроль состава и толщины при изготовлении этих наноструктур КРТ позволяет создавать приборы с заданным спектральным диапазоном.

Нами проведено выращивание наноструктур $Cd_xHg_{1-x}Te/Cd_xHg_{1-x}Te/Cd_xHg_{1-x}Te$ на подложках $CdTe/ZnTe/GaAs(013)$ методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Молярное содержание X_{CdTe} изменялось в интервале от 0,2 до 0,45. Толщина ям в наноструктурах варьировалась в интервале от единиц до сотен нанометров. Широкозонные обкладки имели состав Y_{CdTe} от 0,66 до 0,8 и толщину от 30 нм до сотен нанометров. Прецизионный контроль толщины и состава при выращивании HgCdTe наноструктуры проводился *in-situ* эллипсометрическим методом.

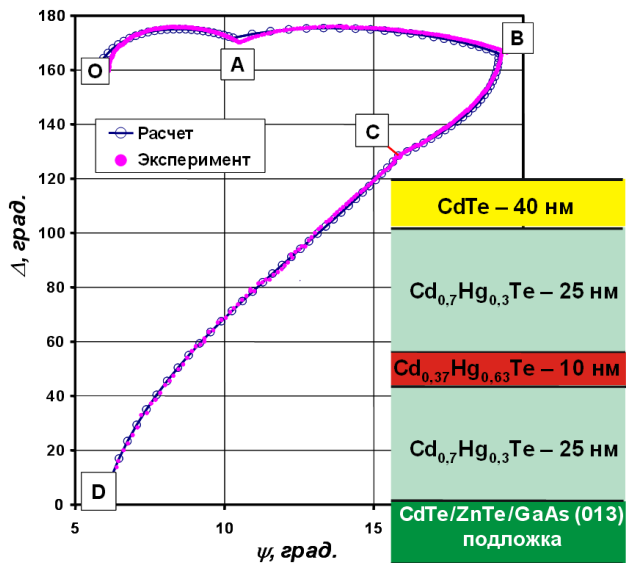


Рис.1 Эволюция эллипсометрических параметров Δ и ψ при росте КЯ. Кривые OA и BC – рост широкозонного слоя. AB - рост КЯ. CD – рост CdTe. Эксперимент – точки, расчет – сплошная линия проходящая через кружки. На вставке-схема слоев КЯ на основе узкозонного твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$.

При этом эллипсометрические параметры Ψ и Δ в плоскости Ψ - Δ описываются кусочно-спиральными кривыми. Положение точек изломов и характер изменения параметров на кривой позволяют определить толщину и состав (рис. 1). Точность определения толщины и состава составили $\Delta d=0,1$ нм и $\Delta X_{CdTe}=0,05$ соответственно. На

вставке к рисунку показана схема слоев квантовой ямы на основе твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$.

Для определения состава квантовых и потенциальных ям после выращивания предложена оригинальная методика *ex-situ* определения состава, основанная на анализе зависимости оптической плотности ямы в наноструктуре $D=\lg(1/(T+R))$ от волнового числа ν , где T и R – коэффициенты пропускания и отражения в области длин волн интерференции в ГЭС КРТ МЛЭ.

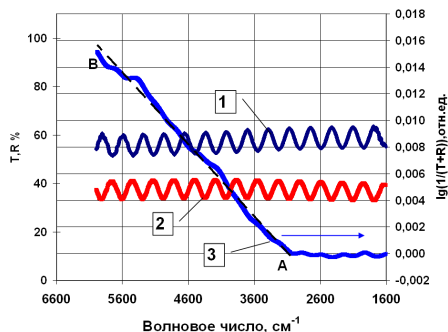


Рис.2 Спектр пропускания (T) – кривая 1. Спектр отражения (R) – кривая 2. Кривая 3 – зависимость оптической плотности $D=\lg(1/(T+R))$ от волнового числа ν .

10 нм составляет $\pm 0,005$. Таким образом, получено хорошее соответствие результатов измерения состава в наноструктурах при *in-situ* и *ex-situ* измерений.

На рис. 2 приведены спектры пропускания T (кривая 1) и отражения R (кривая 2) наноструктуры (квантовая яма) с толщиной ямы 10 нм и составом 0,370, полученным *in-situ* (рис. 1) по эллипсометрическим измерениям. Кривая $D=\lg(1/(T+R))$ (кривая 3) показывает зависимость оптической плотности от волнового числа излучения, что позволяет определить ширину запрещенной зоны E_g и, соответственно, состав. Расчет дал значения состава $X_{CdTe}=0,365$. Точность определения состава зависит от толщины и точности определения линейного участка АВ кривой 3 и для

У24 Влияние материала инжектирующих контактов на ВАХ пленок $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$

Акимов А.Н., Ищенко Д.В., Климов А.Э., Пашин Н.С., Шерстякова В.Н., Шумский В.Н.

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

Как было показано ранее [1,2], транспорт электронов в $PbSnTe:In$ (COT:In), находящемся в полуизолирующем состоянии, осуществляется в условиях преобладания монополярной инжекции электронов из контактов при ограничении тока пространственным зарядом с захватом электронов на локализованные центры в запрещенной зоне.

При анализе вольтамперных характеристик (ВАХ) в этих работах предполагалось, что резервуар электронов при инжекции неограничен. Однако реальная структура и тип контактов могут играть существенную роль, определяя распределение потенциала как вблизи катода, так и вблизи анода, и оказывая влияние на протекание тока и на вид ВАХ. Все исследования ВАХ в [1,2] были проведены на образцах с содержанием олова $x=0,24-0,26$. В то же время увеличение содержания олова уменьшает ширину запрещенной зоны и сдвигает красную границу чувствительности в длинноволновую область, что представляет интерес для ИК фотозлектроники.

В работе исследовались стационарные ВАХ образцов пленок $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ ($x \approx 0,3$) толщиной 1,6 мкм, выращенные на подложках VaF_2 (111) методом МЛЭ. Образцы в темноте охлаждались до $T = 4,2$ К. Изменяемые образцы представляли собой

структуры с двумя металлическими электродами, сформированные на поверхности пленки. Расстояние между электродами составляло $L=64, 32, 16$ и 8 мкм. Длина зазора была около $0,25$ см. Были изготовлены инжектирующие контакты из трех различных металлов: Al, Ni+Al и In.

Полученные ВАХ в целом соответствуют теории токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ). Однако, в зависимости от материалов контактов, ВАХ структур имеют существенные отличия. На Рис. 1 приведены ВАХ для одного из зазоров (32 мкм) структур с разными контактами. Как видно из рисунка, в двойном логарифмическом масштабе ВАХ структур состоят из нескольких участков различной крутизны, которые могут быть аппроксимированы степенными зависимостями тока от напряжения. Однако переход от одного участка к другому происходит при разных напряжениях для образцов с разными металлами. Напряжение перехода от закона Ома к режиму ТОПЗ (V_x) составляет $0,036$ В для структуры с алюминиевыми контактами и $V_x=0,006$ В с индиевыми контактами. Для структуры, которая имеет тонкий (≈ 400 Å) слой никеля под слоем алюминия, не регистрируется начальный медленный участок, а сразу начинается быстрый рост тока. В области ВАХ, соответствующей полному заполнению ловушек, наблюдаются участки роста тока с разными наклонами и при разных напряжениях смещения.

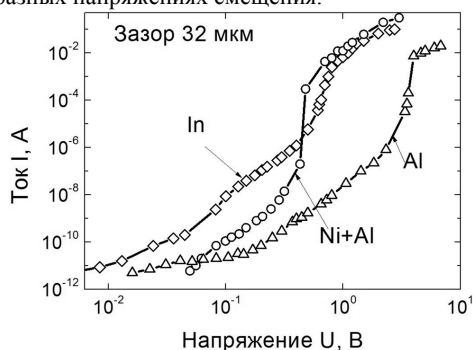


Рис. 1. ВАХ для зазора 32 мкм трех различных структур

В работе рассматривается распределение электрического поля и потенциала в области пространственного заряда для зонной диаграммы металл - COT:In и обсуждаются отличия, которые связаны с разной величиной контактного потенциала и с наличием в объеме материала локализованных центров. Исходя из полученных результатов, можно сказать, что влияние материала контактов проявляется в разном результирующем ходе потенциала и разном соотношении потенциала,

приложенного собственно к диэлектрику и к приконтактной области. Это означает, что ВАХ могут быть сдвинуты как по оси токов, так и по оси напряжений одна относительно другой. Анализ экспериментальных результатов позволяет сделать вывод, что исследованные контакты являются контактами резервуарного типа, а их влияние на протекание инжекционного тока зависит от величины межэлектродного зазора и концентрации уровней захвата, определяющей объемный заряд в приконтактной области.

Показано, что зависимость тока от напряжения для исследованных образцов описывается теорией ТОПЗ в присутствии центров захвата [3]. Однако наблюдавшаяся зависимость тока от ширины межэлектродного зазора L не пропорциональна $1/L^3$. Это объясняется сложным характером распределения электрического поля между электродами из-за наличия областей пространственного заряда, созданных за счет контактной разности потенциалов.

Проведены измерения величины фототока при освещении этих структур одним и тем же излучателем, что позволило оценить качество контактов с точки зрения получения лучшего отношения сигнал/шум.

[2] Акимов А.Н., Ерков В.Г., Климов А.Э., Молодцова Е.Л., Супрун С.П., Шумский В.Н. ФТП **39**, 563 (2005).

[3] Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973, 416 с.

У25 Исследование германиевых подложек, предназначенных для эпитаксии

^{1,2}Бурлаков И.Д., ¹Сизов А.Л., ¹Яковлева Н.И., ¹Коротаев Е.Д., ¹Мирофяненко А.Е.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МИРЭА (Технический университет). Москва, Россия

Для промышленного производства МФПУ дальней области ИК-диапазона спектра наиболее перспективным исходным материалом являются гетероэпитаксиальные структуры тройных соединений кадмий-ртуть-теллур (ГЭС КРТ), выращиваемые методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на оптически прозрачных подложках из германия (Ge) [1, 2]. Атомарная гладкая поверхность с шероховатостью на уровне десятых долей нанометра (наноповерхность), заданные геометрические параметры, хорошая морфология и плоскостность рабочей поверхности, оптическое пропускание в заданном спектральном диапазоне, электрофизические параметры характеризуют максимальную пригодность подложки для выращивания структурно совершенных эпитаксиальных слоев.

В связи с усложнением архитектуры создаваемых ИК-фотоприемников требования к параметрам полупроводниковых подложек постоянно возрастают, что стимулирует поиск и дальнейшее развитие технологии их обработки. Подготовленная к эпитаксии структурно совершенная подложка, обладающая наноповерхностью, получила название «эпиреди», что в переводе с английского означает «готовая к эпитаксии» [3]. В данной работе проведена разработка технологических процессов подготовки подложек для выращивания ГЭС КРТ, включая предэпитаксиальные операции обработки поверхности: химико-механической полировки, очистки, травления и подготовки подложек к эпитаксиальному выращиванию.

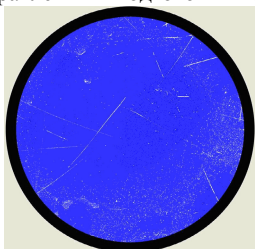


Рис. 1 - Германиевая пластина перед обработкой

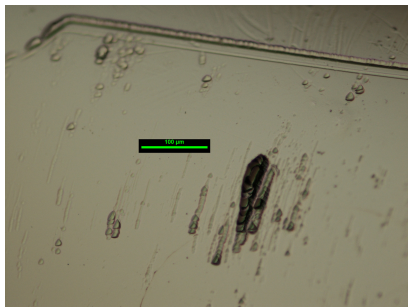
Перед процессом эпитаксии поверхность подложки необходимо избавить от продуктов завершенных последовательных технологических операций. Эта операция заключается в очистке, химической обработке и стабилизации поверхности подложки в органических растворителях с последующей промывкой в особо чистой воде. Фотография подложки перед операциями очистки и обработки поверхности представлена на рис. 1.

Технологический процесс очистки включает несколько последовательных операций. Первоначально Ge подложки обрабатываются в кипящем изопропиловом спирте. Затем очистка образцов проводится в растворе фтористоводородной и серной кислот в определенном соотношении. Процесс осуществляется при комнатной температуре приблизительно 2-4 минуты при непрерывном перемешивании. После очистки необходима операция промывки подложки в деионизованной воде.

Процесс травления проводится при комнатной температуре. В состав травителя входят фтористоводородная кислота и перекись водорода. Длительность травления определяется температурой и концентрацией используемых компонентов. После

травления подложки промываются в деионизованной воде и высушиваются либо в центрифуге, либо в потоке газообразного азота N_2 .

На рис. 2 (а, б) приведены результаты травления германиевых подложек в полирующем травителе: а – до травления, б – после травления. На рис. 2 б наблюдается существенное улучшение состояния поверхности по отношению к первоначальному состоянию. Это свидетельствует о правильном подборе травителя, времени и условий травления.



а) образец 1 (до обработки)



б) образец 1 (после обработки)

Рис. 2

После контакта поверхности подложки с атмосферой на ее поверхности образуется собственный окисел Ge. Для снятия пленки окисла в работе применялся метод ионного травления полупроводниковой Ge подложки, сопровождаемый последовательным пошаговым химическим удалением нарушенных слоев поверхности с последующим хранением в атмосфере газообразного N_2 для защиты поверхности от повторного окисливания

Проведенные исследования параметров пластин германия толщиной 600 ± 20 мкм с ориентацией поверхности $(211) \pm 0,5^\circ$ показали высокие характеристики подложек, а именно, среднеквадратичное отклонение нанощероховатости порядка 0,2-0,6 нм, плоскостность менее 6 мкм на длине 76 мм, оптическое пропускание более 40 % в рабочем спектральном диапазоне. Таким образом, используемые методы химико-механической полировки, химического травления и предэпитаксиального удаления окислов, позволяют полностью подготовить Ge подложку к процессу молекулярно-лучевой эпитаксии.

Литература

1. Zanatta J.P., Ferret P., Theret G., Million A., Wolny M., Chamonal J.P., and Destefanis G. Heteroepitaxy of HgCdTe (211)B on Ge substrates by molecular beam epitaxy for infrared detectors // Journal of Electronic Materials, 1998, Vol. 27, № 6, pp. 542–545.

2. Vilela M.F., Lofgreen D.D., Smith E.P.G., Newton M.D., Venzor G.M., Peterson J.M., Franklin J.J., Reddy M., Thai Y., Patten E.A., Johnson S.M., and Tidrow M.Z. // LWIR HgCdTe Detectors Grown on Ge Substrates // Journal of Electronic Materials, 2008, Vol. 37, No. 9, pp. 1465-1470.

3. Tribolet P., Blondel S., Costa P., Combette A., Vial L., Destefanis G., Ballet P., Zanatta J.P., Gravrand O., Largeton C., Chamonal J.P., Million A. MWIR focal planes arrays made with HgCdTe grown by MBE on germanium substrates // Proc. SPIE, 2006, Vol. 6206, [6206-82].

У26 Современное состояние разработки миниатюрных микрокриогенных систем для охлаждаемых ФПУ

Липин М.В., Громов А.В.

ООО «НТК «Криогенная техника», Омск, Россия

Произошедший в последние годы прогресс в разработке миниатюрных матричных фотоприемных устройств (МФПУ) с малыми тепловыделениями и теплопритоками в холодную зону позволил ООО «НТК «Криогенная техника» разработать несколько конструкций микрокриогенных систем (МКС), имеющих существенно уменьшенные массогабаритные характеристики по сравнению с модульными МКС, разработанными ранее [1].

МКС изготавливаются только из отечественных материалов и комплектующих и позволяют криостатировать фоточувствительные элементы (ФЧЭ) фотоприемных устройств (ФПУ) различного типа на температурном уровне $(65 \div 130)$ К при тепловой нагрузке на МКС от 0,3 до 1,0 Вт. Все разработанные МКС имеют унифицированную интегральную стыковку с криостатом ФПУ, разработаны конструктивные варианты газовых криогенных машин (ГКМ) по схемам «моноблок» и «Сплит-Стирлинг». Масса различных модификаций МКС составляет от 0,6 до 1,5 кг.

Так, например, в 2010 г. завершена разработка микрокриогенной системы МСМГ-0,6А-0,4/80 КВО.0738.000-02 (РКД присвоена литера «О1»), имеющей полную массу менее 0,6 кг и предназначенной для криостатирования МФПУ на температурном уровне (80 ± 2) К. В МКС входит газовая криогенная машина, выполненная в виде моноблока с интегральной стыковкой с криостатом ФПУ, и блок управления (рис. 1).

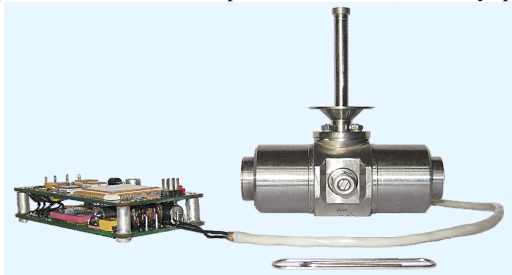


Рис. 1 МКС МСМГ-0,6А-0,4/80 КВО.0738.000-02

Зависимости холодопроизводительности от потребляемой мощности, экспериментально полученные для МКС МСМГ-0,6А-0,4/80 КВО.0738.000-02 при температуре криостатирования 80 К и температуре окружающей среды $T_{oc} = +55^{\circ}\text{C}$ приведены на рис. 2.

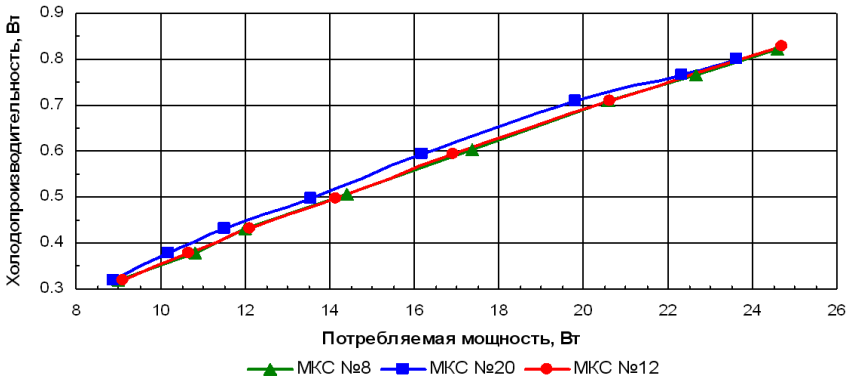


Рисунок 2 Зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС МСМГ-0,6А-04/80 КВО.0738.000-02 при $T_{oc}=+55^{\circ}\text{C}$

МКС МСМГ-0,6А-0,4/80 КВО.0738.000-02 также может использоваться в диапазоне температур криостатирования ($80\div 130$) К, результаты определения холодопроизводительности при $+23^{\circ}\text{C}$ показаны на рисунке 3.

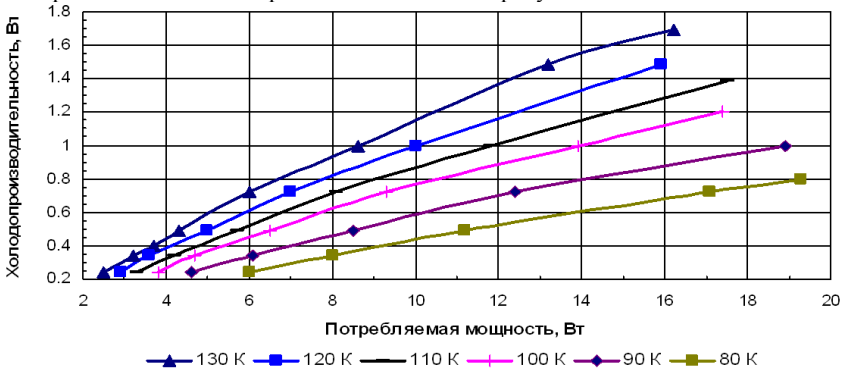


Рис. 3 Зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС МСМГ-0,6А-04/80 КВО.0738.000-02 №4 при различных температурах криостатирования, при $T_{oc}=+23^{\circ}\text{C}$

Приводятся также результаты исследований и испытаний нескольких модификаций модульных МКС в различных условиях, в том числе в диапазонах температур криостатирования ($65\div 80$) К и ($80\div 130$) К, а также ресурсных испытаний с наработкой более 4000 часов.

1. М.В. Липин, А.В. Громов Результаты разработки ряда модульных МКС Сплит – Стирлинг для криостатирования ФПУ 1 – го и 2 – го поколений. //Прикладная физика, №2, 2007г., с. 110 – 119.

У27 Об эффективности материалов для термоэлектрического охлаждения

Булат Л.П., Асач А.В.

НИУ информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Термоэлектрическое охлаждение широко используется для термостабилизации элементов фото- и микроэлектроники. Поэтому повышение термоэлектрической добротности Z и соответствующее увеличение холодильного коэффициента охладителя является актуальной задачей. Как известно, эффективность термоэлектрического материала определяется безразмерным параметром $ZT = T\sigma\alpha^2/\kappa$, где σ , α и κ – коэффициенты электропроводности, теплопроводности и Зеебека, T – абсолютная температура. У лучших коммерчески доступных термоэлектриков $ZT < 1$, 0.

В начале 2000-х годов в США были опубликованы десятки статей, в которых утверждалось, что использование наноструктур с квантовыми точками (0D), квантовыми нитями (1D) и квантовыми ямами (2D) может увеличить термоэлектрическую эффективность в материалах на основе теллурида висмута вплоть до $ZT = 1,5-2,4$. Однако, эти высокие результаты не смогла воспроизвести ни одна лаборатория мира. Причем такие сверхэффективные термоэлектрические наноструктуры, если и могут быть получены экспериментально, требуют использования очень дорогих технологий.

Альтернативой низкоразмерным наноструктурам являются объемные термоэлектрики [1]. Здесь достигнуты определенные успехи в увеличении ZT . Основным механизмом увеличения термоэлектрической эффективности в объемных наноструктурах является снижение решеточной теплопроводности вследствие дополнительного рассеяния фононов на границах нанозерен.

Формирование объемных наноструктур [1] из твердых растворов на основе $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ включает два этапа:

1) создание нанопорошков путем помола в планетарной шаровой мельнице или путем спиннингования, при этом можно получить наночастицы со средним размером $\sim 8-10$ нм;

2) консолидация наночастиц в объемный образец путем спекания под давлением.

Но сохранению наноструктурного состояния в компактных образцах препятствуют процессы рекристаллизации, которые приводят к увеличению размеров зерен до 100-300 нм. Для предотвращения укрупнения зерен при горячем прессовании можно использовать два метода [1]:

1. Добавление в исходную матрицу из нанопорошка Bi-Sb-Te малых добавок наночастиц со слоистой структурой (типа MoS_2 , термически расщепленного графита) или фуллерена. После горячего прессования инородные частицы располагаются по границам частиц основного твердого раствора, препятствуя рекристаллизации.

2. Использование искрового плазменного спекания (spark plasma sintering – SPS) нанопорошков.

Оба метода позволяют сохранить наноструктуру объемного образца, что приводит к росту термоэлектрической эффективности. Так, максимальная эффективность наноструктурных образцов $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$ достигалась при 90°C и составляла $ZT = 1,22$ [1], что на 25% больше, чем в лучших коммерчески доступных термоэлектрических материалах. Механизмы увеличения добротности имеют наглядную физическую природу, и экспериментальные результаты согласуются с теорией [1]. Микроскопическая теория предсказывает даже возможность увеличения ZT в разы при выполнении некоторых жестких требований к наноструктурам [1].

Интересные результаты могут быть получены и путем компьютерного моделирования теплофизических процессов в нанотермоэлектриках.

1. Bulat L.P., Pshenai-Severin D.A., Karatayev V.V., Osvenskii V.B., Parkhomenko Yu.N., Lavrentev M., Sorokin A., Blank V.D., Pivovarov G.I., Bublik V.T., Tabachkova N.Yu. Bulk nanocrystalline thermoelectrics based on Bi-Sb-Te solid solution // Nanoparticles / Book 2, Edited by A.Hashim. InTech, 2012 (ISBN 979-953-307-859-4).

У28 Результаты экспериментальных исследований процессов в баллоне с криогенной заправкой бортовой дроссельной системы охлаждения

Довгялло А.И., Сармин Д.В., Угланов Д.А., Шатохин Е.С.

Самарский государственный аэрокосмический университет, Россия

Обеспечение охлаждения до уровня криогенных температур ИК – приемников, элементов оптических систем и других устройств, устанавливаемых на космических летательных аппаратах, является важнейшим требованием, предъявляемым ко многим космическим проектам. Система охлаждения может иметь различные параметры по массе, потребляемой мощности, габаритам, надежности, холодопроизводительности и температуры термостатирования.

Наипростейшей и наименее дорогой системой охлаждения одноразового действия является система охлаждения, основанная на эффекте Джоуля – Томсона и использующая газ под высоким давлением от 7 до 60 МПа.

Использование гелия, водорода, аргона или азота дает возможность обеспечить температурный уровень охлаждения от 74 К до 4,2 К при суммарной мощности тепловыделения объекта от 0,1 до 10 Вт.

Основным ограничением для применения подобных систем является параметр массы баллона, что обуславливается высоким рабочим давлением газообразного хладагента. Преимуществом дроссельной баллонной системы по сравнению с системой охлаждения основанной на использовании жидкого хладагента, является возможность обеспечения прерывистой (ритмической) работы в течение длительного периода. Одними из основных элементов всего комплекса оборудования в этих технологиях являются: емкости для хранения и выдачи продукта и емкости, эксплуатируемые в составе бортовых комплексов на транспортных средствах или летательных аппаратах.

Примером совмещения существующих и перспективных технологий является патент «Топливный баллон» Самарского государственного аэрокосмического университета (Патент № 2163699, Россия). Идея заключается в том, что в случае заправки баллона газообразным продуктом, он работает как обычный баллон высокого давления, а в случае заправки равным по массе криогенным компонентом, баллон работает в более благоприятных условиях по давлению. Внутренняя термосная емкость для криогенного компонента предотвращает тепловые удары, что характерно для обычных криогенных емкостей, и смягчает условия по термоциклической прочности конструкции.

С целью получения энергетических характеристик баллона при бездренажном хранении и в режиме подачи рабочего тела в дроссельную систему была разработана экспериментальная установка. Основной частью этой установки является макетный образец баллона с криогенной заправкой, выполненного по оригинальной схеме на базе стандартного баллона ГОСТ 949-73.

В процессе эксперимента в баллон помещается термосная емкость с жидким азотом (77 К), крышка емкости герметично закрывается, и производятся замеры. Показания проволочных хромель-копелевых термопар регистрируются измерительным потенциометром ПП-63 класса 0,05. Термопары установлены на наружной стенке баллона, внутри в газовой полости, а также на стенке термоса, и внутри термоса в жидкости. Экспериментальная установка снабжена системой безопасности (в виде двух различных по конструкции предохранительных клапанов).

Установка позволяет исследовать энергетические характеристики баллона (изменение температуры и давления в зависимости от времени, а также оценить тепловые потоки). При проведении испытаний экспериментального образца были поставлены следующие задачи: подтверждение работоспособности баллона с криогенной заправкой в полной комплектации (вентиль баллона, термос, экранная теплоизоляция на основе ЭВТИ и т.д.); получение его энергетических характеристик при различных условиях и режимах работы; подтверждение расчетной методики для бездренажного хранения криопродукта и в расходном режиме.

Испытания были спланированы в три этапа, каждый из которых обусловлен необходимостью проверки влияния текущих доработок конструкции на характеристики баллона с криогенной заправкой с учетом поставленных задач.

Анализ результатов выполненных исследований и их сравнение с теорией позволяют сделать основной вывод о достаточно высоком соответствии экспериментальных данных и расчетной модели, описывающих теплофизику процесса в баллоне. При равных условиях заправки теплофизика процессов подчиняется логике поведения термодинамических системах, а именно при уносе массы (расходный режим) температура у внутренней стенки баллона и температура у внешней поверхности термосной емкости значительно ниже, чем в безрасходном режиме. Это способствует удержанию температуры жидкости на постоянном уровне (около -180°C), что отражено на рис. 1. Эксперимент показывает, что расходный режим при условиях эксперимента позволяет увеличить время подачи жидкого криоагента в два раза (до 80 мин.) Это подтверждает перспективность использования баллона, как возможную технологию использования двухфазной термодинамической системы на примере предлагаемого баллона с криогенной заправкой.

Поведение давления в расходном режиме способствует увеличению ресурса баллона. Естественный рост давления, обусловленный испарением жидкой фазы, не является препятствием для использования баллона в любой момент его параметрического состояния, т.е. при запуске дроссельной системы охлаждения (в момент открытия расходного органа). При этом поведение термодинамических параметров будет соответствовать логике процессов, а время функционирования дроссельной системы все равно будет выше, чем у баллона с заправкой компримированием.

Таким образом, результаты исследований тепловых процессов в баллоне с криогенной заправкой подтверждают перспективность его использования в бортовых системах охлаждения.

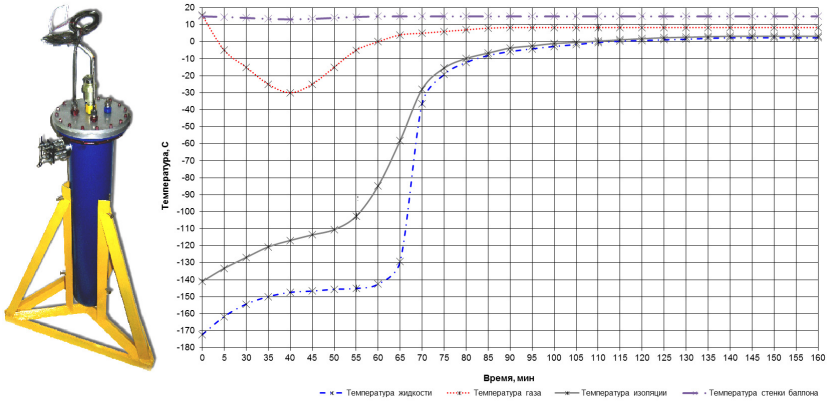


Рисунок 1 – Баллон с криогенной заправкой и график изменения температуры его стенки от времени на расходном режиме работы

У29 Моделирование методов охлаждения оптоэлектронных микрочипов термоэлектрическими кулерами на основе наноматериалов

Дмитриев А.С., Икрин А.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Проблема охлаждения являются одной важнейшей задач при разработке и создании различных оптоэлектронных устройств, включая инфракрасный диапазон. В последнее время, помимо стандартных (механических) систем охлаждения, большое внимание привлекают системы на основе термоэлектрических кулеров. Последние устройства имеют безусловно свою нишу использования, однако нуждаются для повышения эффективности в использовании новых материалов, в частности, наноматериалов.

В настоящей работе описаны принципы термоэлектрического охлаждения, имеющего ряд существенных преимуществ по сравнению с другими способами. Рассчитана модель микроохладителя, на основании которой разработаны принципы для оптимизации работы термоэлектрических охладителей любых типов. Установлено что, температура холодного спая остается постоянной при любых комбинациях термоэлектрических параметров и зависит только от величины ZT.

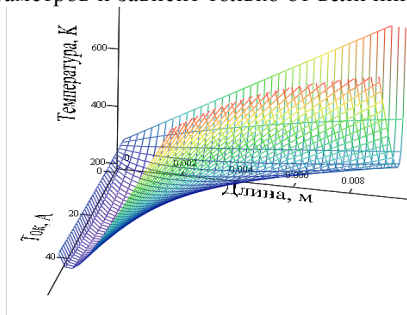


Рис.1. График температуры холодного спая в зависимости от длины ветвей и силы тока

Работа ТЭ охладителя зависит от большого числа параметров, но в данной работе рассмотрены два наиболее значимых: длина ветвей и электрический ток. Исходя из формулировки второго критерия, оптимальные параметры определяются из условия минимума функции температуры холодного спая, поэтому для нахождения оптимальных параметров необходимо приравнять производную функции температуры от нужного параметра к нулю. Оптимальные длина и сила тока являются взаимосвязанными, поэтому задачу нужно решать в комплексе сразу для двух параметров. Для этого температуру холодного спая нужно представить как функцию от длины и тока $T_x=f(L, I)$ - рис.1, глобальный минимум данной функции будет соответствовать $I_{\text{опт}}$ и $L_{\text{опт}}$. В результате при известных прочих параметрах ТЭ охладителя и постоянной тепловой нагрузке температура холодного спая будет иметь минимум при $I_{\text{опт}}$ и $L_{\text{опт}}$.

В работе рассчитан ТЭ охладитель на основе нанокompозитного сплава $\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$ p -типа, используя те же уравнения, что и для микроохладителя. Соотношения и результаты в случае с учетом особенностей наноразмерных эффектов будут опубликованы отдельно. Термоэлектрические параметры для $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ при $T=100^\circ\text{C}$ имеют значения $S_{\text{эфф}}=210$ мкВ/К, $\lambda_{\text{эфф}}=1,0$ Вт/м·К и $\rho_{\text{эфф}}=1,15 \cdot 10^{-5}$ Ом·м, значение добротности составит $ZT(373\text{K})=1,44$. Для возможности корректного сравнения обычного материала и наноструктурированного, примем удельное тепловыделение от микрочипа равным $q_{\text{пред}}=2 \cdot 10^7$ Вт/м³, это позволит нам сравнить распределение температур при оптимальных параметрах для каждого материала. При сохранении всех прочих параметров и условий, соответствующих для модели микроохладителя, оптимальная длина ветвей и ток составят соответственно $L_{\text{Bi}_2\text{Te}_3}=0,305$ мм, $I_{\text{Bi}_2\text{Te}_3}=0,27$ А и $L_{\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3}=1,056$ мм, $I_{\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3}=0,19$ А. На рис.2 представлено распределение температуры по длине ТЭ ветви для модулей на основе сплава Bi_2Te_3 и нанокompозитного сплава $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ при оптимальных параметрах, последний имеет температуру холодного спая на $\Delta T=2,5$ К ниже. С количественной точки зрения преимущество нанокompозитного сплава минимально, так как добротность его не намного больше, чем для обычного сплава, но важен сам факт возможности создания ТЭ модулей на основе наноструктурированных материалов способных охлаждать более эффективно, чем при использовании самых лучших сплавов.

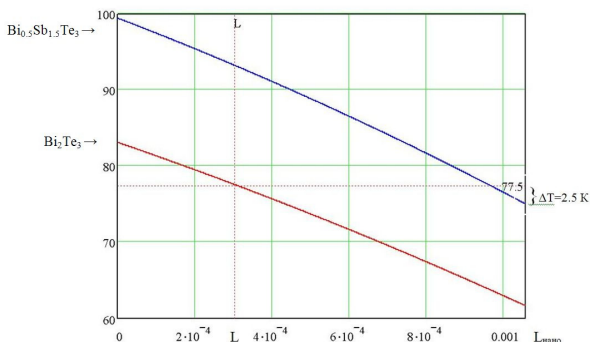


Рис.2. Распределение температуры по длине ТЭ ветви для сплава Bi_2Te_3 и нанокompозитного сплава $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ при оптимальных параметрах. Температура холодного спая для Bi_2Te_3 соответствует значению при L , а для $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ при $L_{\text{нано}}$

Рассматривается возможность повышения эффективности термоэлектрического охлаждения за счет изменения геометрии

термоэлектрический ветвей. Произведен сравнительный анализ работы ТЭ охладителей на основе лучших объемных сплавов и нанокompозитного сплава $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$, в результате чего было установлено, что применение наноструктурированных материалов позволяет повысить эффективность работы ТЭ модулей. Применение нестационарного режима с определенной временной зависимостью тока питания позволяет получить значительное, но кратковременное дополнительное снижение температуры объекта охлаждения. Данное свойство может быть полезным для охлаждения датчиков и прочих устройств с не постоянными тепловыделениями.

Литература

1. А.С. Дмитриев. Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2012.
2. А.С. Дмитриев, А.А. Икрин. Математические модели и оптимизация тепловых процессов в микро- и нанотермоэлектрических охладителях. Труды 5 Российской Национальной конференции по теплообмену. М. Изд. МЭИ. 2010.
3. А.С. Дмитриев, А.А. Икрин. Исследование новых методов термоэлектрического охлаждения на основе наноструктурированных материалов. Материалы XVII Международной НТК «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» 24-25 февраля 2011. М.: МЭИ, 2011.

У30 Цифровой визирный канал круглосуточного прибора наблюдения

^{1,2}Голицын А.А.

¹Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет, Россия

Обработка изображений является многоплановой задачей. В нее входит решение задач фильтрации шумов, геометрической коррекции, усиления локальных контрастов, резкости, восстановления изображений и др. Основная цель обработок – это повышение информативности изображения и преобразование его к виду, комфортному для наблюдателя [1].

На сегодня не существует универсального метода повышения качества изображения. Существует множество алгоритмов обработки изображений, каждый из которых может быть применен исходя из конкретных требований, предъявляемых к устройствам. Как правило, проектирование конкретной электронной платы обработки изображения ведется с учетом наперед выбранного алгоритма. И если необходимо сменить алгоритм, то неизбежно возникает необходимость проектирования новой платы.

В настоящей работе решалась задача создания такой аппаратно-программной платформы, в которой реализуется возможность оптимизации программных средств без изменения конструкции печатной платы, на которой размещены функциональные модули. Такое решение существенно повышает гибкость создаваемых аппаратных средств обработки изображения, обеспечивая возможность подбора наиболее подходящего алгоритма для оптимального решения поставленной для прибора наблюдения задачи.

В цифровых телевизионных системах качество изображения, получаемого с фотоприемного устройства (чаще всего ПЗС или КМОП матрицы), определяется большим количеством технических характеристик: соотношением сигнал/шум, статистическими характеристиками шума, градационными характеристиками,

интервалами дискретизации и т.д. [1]. Улучшение каждого параметра путем преобразования изображения требует больших вычислительных мощностей [2]. Так, при разрешении изображения 640×480 пикселей и скорости видеопотока 25 кадров в секунду для применения типового алгоритма нормировки яркости требуется выполнение процессором $640 \times 480 \times 25 \times 4 = 30\,720\,000$ вычислительных операций в секунду (и каждая из которых не может быть выполнена за один такт), при этом кроме собственно вычислений требуются операции по чтению/записи данных в память. Применение же одновременно нескольких алгоритмов требует еще большего количества вычислительных ресурсов процессора, который кроме задач обработки изображения должен еще осуществлять управление всем прибором. Проблема может решаться либо использованием многопроцессорных систем, что приводит к возрастанию энергопотребления, либо использованием реконфигурируемой системы на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС).

В результате работы был разработан цифровой телевизионный канал на базе низкоуровневой ПЗС-матрицы и реконфигурируемого модуля, состоящего из работающих в паре ПЛИС и сигнального процессора. Структурная схема канала изображена на рис. 1. Так как на базе ПЛИС реализовать сложный алгоритм обработки изображения достаточно трудоемко, алгоритмы сначала реализовывались программно на базе персонального компьютера (ПК), а затем, если исследуемый алгоритм действительно улучшал качество наблюдаемого изображения, он реализовывался в цифровом телевизионном канале аппаратно – в ПЛИС и сигнальном процессоре. Для передачи изображения на ПК в схему визирного канала был включен приемопередатчик HighSpeed USB 2.0

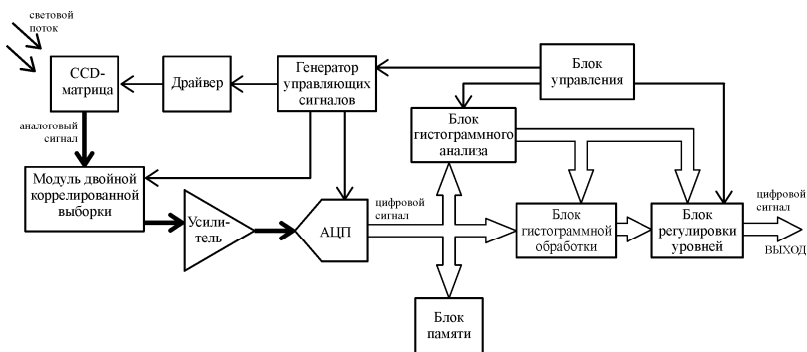


Рис. 1 – Структурная схема цифрового визирного канала

В ходе экспериментов были выбраны несколько типовых алгоритмов обработки изображения и их комбинации, позволяющие существенно улучшить качество изображения в различных условиях, таких как слабая освещенность, наличие в поле зрения одновременно слабо освещенных и сильно освещенных объектов, встречная засветка.

Внешний вид визирного канала представлен на рис. 2.



Рис. 2 – Внешний вид цифрового визирного канала

Разработанный цифровой визирный канал обладает следующими характеристиками:

- Формат ПЗС-фотоприемника: 1/3", 752×592;
- Диапазон рабочих освещенностей: $10^{-3} \dots 10^5$ лк;
- Вывод изображения на внешние устройства в аналоговом виде: VESA;
- Вывод изображения в цифровом виде: параллельная шина и USB 2.0;
- Разрядность цифрового потока данных: 12 бит;
- Кадровая частота: 25 кадров/сек;
- Потребляемая мощность: 1,8 Вт (при напряжении питания 6 В);
- Размеры модуля без объектива: 50×50×30 мм;
- Рабочий температурный диапазон: $-40 \dots +50^\circ\text{C}$

Литература

[1] Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений* // пер. с английского под редакцией П.А. Чочиа, М.: Техносфера, 2005, 1071 с.

[2] Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А. *Цифровая обработка изображений в информационных системах: учебное пособие*, Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000, 168 с.

У31 Двухканальный ночной прицел для переносных зенитно-ракетных комплексов

^{1,2}Дирочка А.И., ¹Кошавцев Н.Ф.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

Высокоэффективным средством борьбы с низколетящими целями (вертолёты, самолёты) являются переносные зенитно-ракетные комплексы (ПЗРК). Учитывая, что боевые действия должны вестись как днём, так и ночью, ПЗРК должен иметь ночной прицел. Обычно в качестве ночного прицела ПЗРК использовался модернизированный одноканальный ночной прицел для индивидуального стрелкового оружия. Недостатком этого прицела является невозможность реализации одновременно двух основных характеристик, включающих большую дальность обнаружения высокоскоростных целей (более 10 км) и достаточно широкое поле зрения, необходимое для сопровождения цели после её захвата головкой самонаведения ракеты при дальности менее 3 км. Эта задача решается с помощью двухканального прицела.

Двухканальный прицел ночного видения содержит оптико-электронный канал наблюдения за воздушным пространством с двумя полями (широким 23° и узким $7^\circ 30'$). В прицеле введён канал визуального отображения служебной информации

(текущая дальность до цели, азимут цели и сигнал о захвате цели головкой самонаведения ракеты). Служебная информация подаётся от средств целеуказания, размещённых на стойке крепления пусковой установки ракеты.

Поля зрения оптико-электронного канала формируются двумя объективами (короткофокусным и длиннофокусным). Переключение объективов производится специальным механизмом полей зрения. Изображение пространства предметов и цели формируется на фотокатоде электронно-оптического преобразователя (ЭОП). Как правило, используется бипланарный ЭОП второго или третьего поколений. Изображение цели и прицельная марка наблюдаются на экране ЭОП через окулярную систему. Яркость марки устанавливает оператор.

Канал визуализации служебной информации выполнен в виде псевдоокуляра, в поле зрения которого высвечивается текущая дальность до цели, азимут движения цели - «влево» или «вправо» и сигнал о захвате цели головкой самонаведения. Сигнал о захвате цели вводится с помощью световолоконного жгута, на входной торец которого подаётся сигнал с индикатора захвата цели, размещённого на пусковой трубе. Оператор наблюдает основную информацию о цели и служебную одновременно совмещённую в одном изображении.

Установка линии прицеливания, которая должна проходить через центр прицельной марки относительно посадочного места пусковой трубы ПЗРК осуществляется перемещением сетки по горизонтали и вертикали соответствующими винтами.

Работу с прицелом начинают при установке длиннофокусного объектива. При этом осуществляют поиск и обнаружение цели на дальностях более 3 км. Обнаруженная цель сопровождается до дальности 3 км. После этого происходит автоматическое переключение длиннофокусного объектива на короткофокусный, и цель сопровождается в широком поле зрения до момента захвата головкой самонаведения. При этом в поле зрения оператора загорается красный сигнал о захвате цели. Оператор производит пуск ракеты. Переключение на работу с длиннофокусным объективом производится вручную.

Электропитание прицела обеспечивается от внешнего источника питания.

Основные характеристики прицела

Дальность обнаружения в нормированных условиях цели типа вертолёт, км	узкое поле зрения 10 широкое поле зрения 5
Поле зрения	узкое 7°30' широкое 23°
Увеличение	узкое поле зрения 7,8 крат широкое поле зрения 2,6 крат

Литература.

1. Патент на изобретение №2296938 Двухканальный прицел ночного видения. Болдырев Г.П., Кошавцев Н.Ф. и др. Приоритет от 10.04.2002 г.

У32 Система обнаружения и точного определения координат комплекса активной защиты летательного аппарата

Кондранин Е.А., ¹Кошавцев Н.Ф., Падалко Г.А., Покотило С.А.

*ФГУП «НИИ специальных информационно-измерительных систем»,
Ростов-на-Дону, Россия*

¹ *ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия*

Недостатками современных комплексов и систем активной защиты летательных аппаратов, в частности вертолётов, являются: недостаточные размеры секторов защиты; отсутствие в составе бортовых комплексов обороны подсистем точного определения координат; в качестве основной системы обнаружения используются радиолокационные станции, работающие в активном режиме и поэтому не позволяющие эффективно работать в условиях интенсивного радиопротиводействия: отсутствие возможности получения дополнительных признаков обнаруживаемых угроз за счёт работы в других спектральных диапазонах.

Поэтому актуальной задачей является обеспечение надёжного обнаружения подлетающего к объекту защиты боеприпаса на дальностях до 100 км, точного определения его координат на дальностях не менее 15-20 км и обеспечения пуска средства активной защиты (противоракеты, ловушки из сверхпрочной ткани и т.п.) для его нейтрализации (уничтожения, искажающего изменения его траектории, функционального поражения и т.п.) в условиях интенсивного радио- и/или «теплого» противодействия.

Поставленная задача решается за счёт использования в составе автоматического комплекса активной индивидуальной защиты (АКАИЗ) вертолёта тепlopеленгатора (тепловидеопеленгатора), обеспечивающего грубое определение координат подлетающего боеприпаса в диапазоне углов обзора 360°x360°; системы точного определения координат (СТОК), работающей в ближнем инфракрасном диапазоне при подсвете подлетающего боеприпаса инфракрасным излучением лазера подсвета с блоком стробирования: видимого канала обнаружения; ультрафиолетового канала обнаружения: управляющей электронно-вычислительной машины (ЭВМ) и координатора (подвижного или неподвижного) противоракеты, связанного с её системой автоматического управления (САУ) и выдающего в неё сигналы рассогласования, пропорциональные азимуту и углу места подлетающего боеприпаса.

Тепlopеленгатор состоит из оптической системы ФПУ, содержащего чувствительные элементы приёмника инфракрасного излучения с предварительными усилителями и коммутатором. Сигналы об азимуте и угле места подлетающего боеприпаса подаются в блок обработки сигналов и далее – в управляющую ЭВМ. По результатам натурных испытаний, проведённых в ОАО «АОМЗ», самолёты в передней полусфере обнаруживаются на дальностях до 70 км.

Система точного определения координат запускается по сигналу с управляющей ЭВМ. Одновременно включается импульс лазерного подсвета. СТОК состоит из оптической системы, импульсных электронно-оптических преобразователей (ИЭОП), оптики переноса, матрицы ПЗС блока обработки сигналов и выдаёт из него в управляющую ЭВМ сигнал о направлении движения подлетающего средства нападения с точным определением координат (не хуже 15-20 угл. с) относительно оптической оси СТОК и дальности до боеприпаса.

Оптическая ось СТОК ориентируется на цель по сигналам с тепlopеленгатора через его блок обработки сигналов и управляющую ЭВМ. В СТОК предусматриваются четыре устройства, в качестве которых применены ЭОП 3-го поколения, каждый из

которых перекрывает поле зрения по азимуту и углу места. СТОК работает по энергетической яркости цели, которая обеспечивается за счёт её подсвета импульсным лазером, источник мигания которого синхронизирован с работой ЭОП, также работающего в импульсном режиме, посредством блока стробирования. Сигнал от СТОК подается в управляющую ЭВМ после того, как установлено, что подлетающий боеприпас направляется на защищаемый объект. По результатам натурных испытаний, проведённых в ОАО «Катод», точное определение координат подлетающих боеприпасов возможно на дальностях не менее 5 км.

В ЭВМ вырабатываются сигналы управления координатором, состоящим из обтекателя, оптической системы, фотоприёмного устройства, включающего в себя многоэлементный приёмник оптического излучения, работающий в инфракрасном диапазоне, предварительные усилители и коммутатор, блока обработки сигналов и системы глубокого охлаждения. Координатор запускается по сигналам от управляющей ЭВМ и выводится на рабочий режим. После захвата подлетающего боеприпаса с защищаемого объекта производится запуск противоракеты, управляемой САУ, для поражения боеприпаса.

Видимый и ультрафиолетовый каналы обнаружения комплекса активной индивидуальной защиты предназначены для получения дополнительной информации о подлетающем средстве нападения и служат для повышения вероятности обнаружения и точного определения координат при работе в верхнюю и/или нижнюю полусферу. Видимый канал работает в видимом диапазоне оптического излучения (0,38-0,78 мкм) и включает в себя оптическую систему. ФПУ на матрице приёмников с зарядовой связью (ПЗС-матрице) и блок обработки сигналов.

Ультрафиолетовый канал работает в диапазоне длин волн 0,32-0,4 мкм. Он включает в себя оптическую систему, ЭОП, работающий в ультрафиолетовом диапазоне оптического излучения, оптику переноса изображения, матрицу ПЗС и блок обработки сигналов. Применение этих каналов является особенно эффективным для защиты летательных аппаратов за пределами нижних слоев атмосферы (на высотах более 5 км) и при отсутствии облачности.

Введение в состав комплекса активной индивидуальной защиты тепловидеопеленгатора (тепловидеоопеленгатора) с угловым обзором 360°x360°, системы точного определения координат подлетающих средств поражения, основанной на применении импульсных электронно-оптических преобразователей с синхронным импульсным подсветом лазерным излучением обнаруживаемых средств поражения, а также видимого и ультрафиолетового каналов, позволяет решить задачу обеспечения практически 100%-ной вероятности обнаружения и точность определения координат средства нападения на защищаемый объект для исключения промаха в условиях интенсивного радио- и/или теплового противодействия.

У33 О возможности расчёта широкоугольных объективов с особыми требованиями к мгновенному полю зрения и освещенности

Правдивцев А.В.

*Научно-исследовательская группа «Конструктивная Кибернетика»,
Москва, Россия*

С появлением матричных приёмников излучения (МПИ) большой размерности, для решения определённых задач, становится целесообразным в тепловизионных и тепловидеопеленгационных системах применять широкоугольные оптические системы (ОС).

В свою очередь, тепловые пеленгационные станции требуют, для случая статистически однородных фонов, равномерного потенциального отношения «сигнал/фон» по всему полю зрения. Кроме того, для увеличения динамического диапазона оптико-электронной системы (ОЭС), требуется получить равномерность освещенности в плоскости изображения. В связи с этим становится актуальным вопрос разработки ОС со специфическими требованиями по изменению мгновенного (элементарного) поля зрения (IFOV) и освещенности в плоскости изображения.

Сравним два случая формирования ОС, отличающихся требованиями по коррекции IFOV и итоговой освещенности: в первом допускается отклонение от равномерности не более 10%, во втором – 1%. Рассмотренные ОС предназначены для работы с удаленными объектами и могут быть использованы в мультисенсорной ОЭС. В этом случае интегральное поле зрения формируется с использованием ряда однотипных модулей. Один из вариантов формирования общего поля зрения с минимальным перекрытием это применение ОС с полем зрения 61° .

При синтезе и оптимизации оптических систем применялась полуаналитическая методика, позволяющая контролировать изменение мгновенного поля зрения пикселя и освещенности в процессе проектирования. Она основана на расчёте итоговой освещенности в плоскости МПИ, с учетом как предполагаемого применения ОЭС, так и технических характеристик используемых ОС.

Получение требуемого отклонения IFOV и освещенности возможно в 2-х отличающихся конструкциях ОС: а) использование охлаждаемого приёмника излучения, диафрагма ОС располагается после объектива; б) перенос части линз в холодную область приёмника. Разработка ОС с допустимым отклонением IFOV и освещенности 1% возможна только с использованием варианта б (не рассматривается случай применения просветляющих покрытий, уменьшающих пропускание в центре поля для коррекции равномерности освещенности).

В результате было рассчитано три варианта ОС, обладающие следующими характеристиками: угловое поле в пространстве предметов 61° , относительное отверстие системы 1:1, спектральный диапазон 3,6–4,8 мкм, размерность охлаждаемого матричного приёмника излучения 512x512, размер пикселя 15 мкм, концентрация энергии в квадрате размером 2x2 пикселя более 85%. Так как разработанные системы разрабатывались с учётом возможности использования их в мультисенсорной ОЭС, одним из требований была минимизация габаритов ОС.

На рис. 1 приведены изменение мгновенного поля зрения пикселя (а) и относительная итоговая освещенности по полю зрения (б); в таблице 1 приведены относительные характерные размеры полученных ОС.

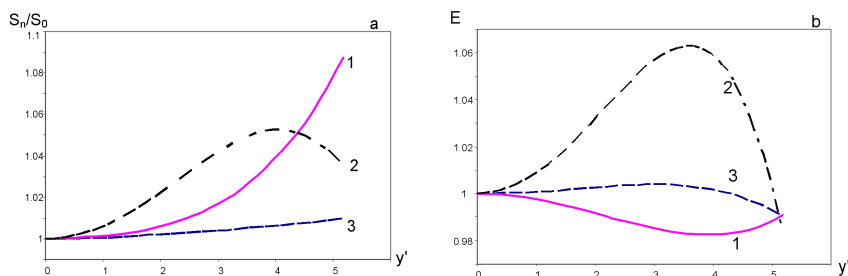


Рис. 1. а) Изменение мгновенного поля зрения пикселя; б) Относительная итоговая освещенность на приёмнике.

Цифрами на рис. 1 и в таблице 1 обозначены варианты: 1 - ОС с апертурной диафрагмой расположенной после объектива; 2 - ОС, часть линз которой перенесено в криогенную область; 3 – ОС с линзами в криогенной области с требованиями по отклонению IFOV и освещенности менее 1%. В таблице 1 за единичные значения параметров приняты таковые для варианта 2.

Для варианта 1 полученная коррекция равномерности освещенности стала возможной за счет увеличения мгновенного поля зрения пикселя на краю поля; данное изменение должно быть учтено в алгоритмах обработки изображения.

Таблица 1. Относительные габариты ОС

Вариант	L_{OS}	L_C	D_{FL}	D_W	V_{CA}
1	1,9	0,65	1,30	1,85	1,10
3	1,2	1,25	1,15	1,35	1,50

Перенос линз в холодную область позволил существенно уменьшить L_{OS} – длину совокупности ОС-приёмник излучения, а так же D_{FL} - диаметр первой линзы. Несмотря на некоторое увеличение длины холодной области (L_C), изменение её геометрии, за счёт уменьшения размеров входного окна приёмника (D_W), позволило уменьшить объем холодной области (V_{CA}). Кроме того, в этом случае стало возможным получения более высокого качества одновременной коррекции равномерности IFOV и освещенности.

Продемонстрирована возможность синтеза объективов с заданными, особыми требованиями к равномерности мгновенного поля зрения и освещенности в плоскости охлаждаемого приёмника. Проведено сравнение рассчитанных вариантов с отклонением от равномерности IFOV и освещенности не более: 10% и 1%, по каждому параметру. Таким образом, подтверждена работоспособность оригинальной методики синтеза. В настоящий момент проводятся исследования на предмет её расширения и определения границ применимости.

У34 Проектирование охлаждаемых интерференционных светофильтров для фотоприемных устройств ИК диапазона

Гиндин П.Д., Карпов В.В., Степанов Р.О.

ОАО «Московский завод «Сапфир», Москва, Россия

В настоящее время перед разработчиками охлаждаемых фотоприемных устройств длинноволнового (8...12 мкм) ИК диапазона часто ставится задача применения блокирующих коротковолновых светофильтров для выделения информативных участков спектра.

Особенность работы таких фильтров обусловлена необходимостью их размещения в охлаждаемой зоне криостата фотоприемного устройства с целью уменьшения фоновой нагрузки, создаваемой собственным излучением светофильтра. В этой связи к светофильтру предъявляются специфические требования, а именно: необходимость обеспечения требуемой спектральной характеристики при температуре близкой к минус 196°С, устойчивость интерференционного покрытия к многократным циклическим перепадам температур от минус 196°С до плюс 20°С, малая масса светофильтра, обеспечивающая минимальное время выхода фотоприемного устройства на рабочий температурный режим.

В докладе представлены апробированные в ОАО «МЗ «САПФИР» рекомендации, позволяющие учесть условия их эксплуатации, на этапе расчета интерференционного покрытия.

Рассмотрены основные этапы проектирования охлаждаемых интерференционных светофильтров для ИК ФПУ. Обоснован подход к выбору материалов подложек и наносимых интерференционных слоев с учетом изменения их оптических параметров при охлаждении до криогенных температур. Приведена исходная структура интерференционного покрытия и определены варианты конструкции охлаждаемых светофильтров, обеспечивающие получение требуемых оптических характеристик с заданной точностью.

Показано, как выполнить этапы проектирования светофильтра с помощью САПР “Optilayer”, внедренной в ОАО «МЗ «САПФИР».

Разработаны конструкции и изготовлены образцы отрезающих охлаждаемых светофильтров. Полученные образцы использованы для комплектации изделий ОАО «МЗ «САПФИР». Пример типовой спектральной характеристики одной из таких конструкций построенной на подложке из Ge представлен на рис.

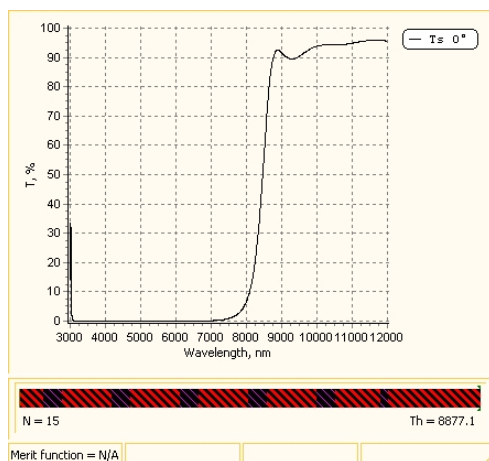


Рис. Спектральная характеристика охлаждаемого светофильтра на подложке из Ge с интерференционным покрытием на основе слоев Ge и YF₃.

Анализ полученных в работе результатов, позволяет утверждать, что они удовлетворяют требованиям к охлаждаемым фильтрам современных ФПУ длинноволнового ИК диапазона. При этом предложенный подход к разработке охлаждаемых светофильтров с использованием новейших САПР существенно уменьшает трудоемкость проектирования и помогает учесть особенности эксплуатации интерференционных конструкций в условиях криогенных температур.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что сформулированные в докладе рекомендации по проектированию охлаждаемых светофильтров представляют практический интерес.

У35 Перспективы применения крупногабаритных оптических элементов из сапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) в оптико-электронных комплексах нового поколения

Сенник Б.Н.

ФНПЦ ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева

Одной из основных тенденций создания оптико-электронных приборов и комплексов нового поколения (широкоспектральных, работающих в УФ, видимом и ИК диапазонах) является постоянное повышение уровня информативности за счёт увеличения оптических каналов. Развитие современного оптико-электронного приборостроения на сегодняшний день в первую очередь зависит от состояния оптической элементной базы. Для решения указанной проблемы необходимо обеспечить фундаментальные исследования в области синтеза оптических материалов, обеспечивающих получение высококачественных крупногабаритных оптических заготовок с максимальным светопропусканием во всех спектральных диапазонах, а также создание промышленной технологии изготовления высокоточных оптических элементов из различных оптических кристаллов (с отклонениями от заданных геометрических поверхностей в пределах 30-50 нм, степенью шероховатости оптических поверхностей в пределах 10 Å и максимальной степенью чистоты обработки). В докладе подробно анализируется состояние промышленных технологий изготовления вышеуказанных оптических элементов из $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в Российской Федерации и проблемные вопросы, которые необходимо решить для обеспечения уровня технологии, с целью получения оптических элементов с заданными требованиями.

Сапфир ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), как оптический материал, обладает несомненными физико-химическими преимуществами.

Оптически прозрачный в спектральном диапазоне от 0,15 до 5,66 мкм, что в свою очередь позволяет использовать его в оптических и оптико-электронных системах, работающих как в УФ, видимом, так и ИК диапазонах спектра. На сегодняшний день тщательно исследованы оптические характеристики этого материала: показатель преломления и коэффициенты дисперсии в указанном спектральном диапазоне с точностью до пятого знака после запятой. Как оптическая среда, материал обладает высокой однородностью и отсутствием дефектов в виде пузырей, свилей и т. д.

Средний коэффициент линейного температурного расширения в интервале температур от -60°C - $+60^\circ\text{C}$ – $5,7 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$, модуль упругости – $4,8 \cdot 10^{11}$, твёрдость по шкале Мооса – 9. Химически устойчивый материал.

В настоящее время промышленная технология изготовления оптических элементов из сапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) отработана только для нужд электронной промышленности. Теоретически исследованы многофакторные условия формирования нанорельефа поверхности детали с требованиями по шероховатости $Rz \leq 0,2$ нм, классом чистоты (Р 0-10, Р 0-20), в первую очередь механики и физико-химического контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали.

Широко используются технологии тонкого алмазного шлифования и трибохимического полирования. Но, к сожалению, данная технология не позволяет на сегодняшний день обеспечить изготовление крупногабаритных прецизионных оптических элементов с требованиями к поверхности в пределах 50 нм, шероховатости $Rz \leq 5$ нм, классу чистоты 0-40.

Автор в своём докладе анализирует различные технологические подходы к изготовлению такого класса деталей и представляет результаты экспериментальных работ.

Литература:

1. В. Альтшуллер, С. Герасимов, М. Грималюк. Алмазный инструмент для шлифования оптических деталей из лейкосапфира. Научно-технический и гуманитарный сборник МАК (РОМАК) декабрь 2009 г. с. 40-42.

2. Рогов В.В. Нанотехнологии финишной прецизионной обработки функциональных поверхностей деталей оптики, электроники, лазерной техники и радиометрии из стекла, ситалла, сапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), полистирола и щёлочно-галлоидных кристаллов. Научно-технический и гуманитарный сборник МАК (РОМАК) май 2011г. с. 30-37.

У36 Способы получения стереоскопического тепловизионного изображения с использованием одного приёмника излучения

Рафаилович А.С.

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», Новосибирск, Россия

Вероятности обнаружения и распознавания связаны с особенностями восприятия изображения человеком - оператором. Для человека более естественным является пространственное (стереоскопическое) зрение. При наблюдении двумя глазами большинство людей способно непосредственно воспринимать взаимное пространственное расположение предметов – пространственную глубину сцены, что даёт оператору дополнительную информацию облегчающую восприятие. Физиологические особенности человека таковы, что бинокулярная острота зрения выше монокулярной в среднем в 1,3 раза. Причина этого в том, что разрешающая способность глаза в среднем равна одной угловой минуте, в то время как разрешающая способность стереоскопического зрения может составлять десять угловых секунд и менее (для тренированного наблюдателя). Кроме того, в работе отмечается, что времена распознавания и воспроизведения для объёмных зрительных стимулов, возникающих только при стереоскопическом зрении меньше, чем для плоских

За счёт перехода к бинокулярной схеме возможно добиться повышения вероятности обнаружения и распознавания по сравнению с монокулярным прибором, имеющим аналогичные технические параметры.

Структурная схема бинокулярного тепловизора показана на рис. 1.

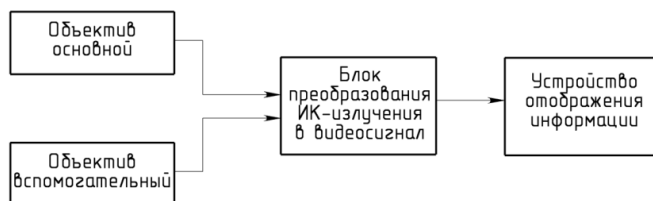


Рис. 1 – Структурная схема бинокулярного 3D-тепловизора

Исходя из стоимостных и технических соображений, наиболее оптимальным является построение бинокулярного тепловизора на одном фотоприёмнике.

В докладе:

- рассмотрены основные способы и устройства для получения стереоскопического изображения описываемые в [1-4];
- предложен способ усовершенствования устройства, описанного в [4];
- описан разработанный и изготовленный макет носимого (вес до 3,5 кг) бинокулярного стереоскопического тепловизора на одном фотоприёмнике (изображён на рисунках 2 и 3);
- рассмотрены перспективы применения и дальнейшего развития подобных устройств.



Рис. 2 – Внешний вид макета модуля оптикоэлектронного



Рис. 3 – Устройство отображения стереоскопической информации

Литература

- [1] US 7098458 B2, 2006
- [2] US 2006/0082979 A1, 2006
- [3] US 2005/0185050 A1, 2005
- [4] RU 2433435 C1, 2010

У37 Особенности регистрации точечных источников излучения фотоприемными устройствами с режимом ВЗН

^{1,2}Соляков В.Н., ¹Филачев А.М.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

Фотоприемные устройства (ФПУ) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) широко используются для регистрации излучения в различных спектральных диапазонах для достижения предельных значений по чувствительности и пространственному разрешению [1-5]. В настоящей работе рассмотрены особенности применения таких ФПУ для регистрации точечных источников излучения.

При регистрации точечных источников излучения в фокальной плоскости формируется распределение интенсивности (пятно) излучения, которое не зависит от

размеров источника излучения, а определяется свойствами оптической системы и трассы прохождения излучения. Так как количество независимых факторов, определяющих распределение интенсивности в пятне, достаточно велико, то в большинстве случаев это распределение можно представить в виде Гауссовой функции [6]:

$$I(R) = I_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2 \times R^2}\right),$$

где I_0 – интенсивность излучения в центре пятна, R – радиус пятна. На расстоянии R от центра пятна интенсивность составляет $0,6 \times I_0$.

Будем считать, что регистрация излучения проводится фоточувствительным элементом (ФЧЭ) квадратной формы с размером $2 \times a \times R$ и равномерным распределением чувствительности по площади ФЧЭ. При этом существует оптимальное значение a , при котором достигается максимальное отношение сигнал/шум. На Рис. 1 представлены зависимости сигнала (Signal) и отношения сигнал/шум (SNR) от a для случая совпадения центров пятна излучения и ФЧЭ.

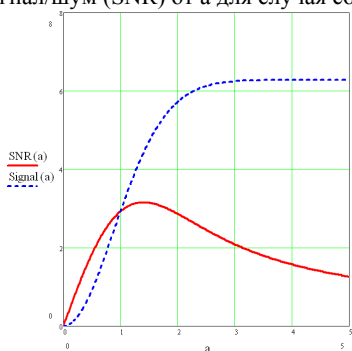


Рис. 1

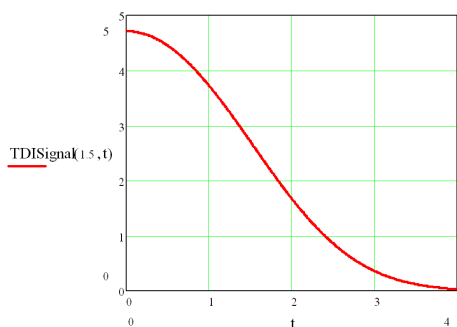


Рис. 2

Оптимальное значение a составляет $\approx 1,5$, при этом на ФЧЭ попадает $\approx 0,75$ полной мощности излучения в пятне.

При регистрации точечного источника фотоприемным устройством (ФПУ) с режимом ВЗН происходит перемещение пятна излучения относительно ФЧЭ во время интегрирования фототока, что приводит к уменьшению результирующего сигнала по сравнению со случаем регистрации неподвижного источника. На Рис. 2 представлена зависимость сигнала от величины смещения t центра пятна относительно центра фоточувствительной площадки (смещение выражено в единицах R) для оптимального значения $a=1,5$. Если в режиме ВЗН выборки сигнала проводятся два раза на пиксел изображения, то пятно излучения за время одного цикла интегрирования фототока перемещается относительно ФЧЭ на расстояние дискретизации изображения в фокальной плоскости, которое составляет половину размера ФЧЭ, то есть на расстояние $a \times R$. Если начало интегрирования фототока начинается в момент, когда центр пятна находится в центре ФЧЭ, то проинтегрированный сигнал будет составлять 0,84 от значения сигнала при неподвижном пятне с центром в центре ФЧЭ. Для случая, когда размер ФЧЭ соответствует размеру пятна по уровню 0,5 ($a=1,2$), коэффициент уменьшения сигнала составит 0,88. Отметим, что это минимальное значение коэффициента уменьшения сигнала, при произвольном начальном положении центра пятна на площади ФЧЭ проинтегрированный сигнал будет выше.

Дополнительное уменьшение регистрируемого сигнала может возникать при несоответствии скорости сканирования и периода опроса линейки ВЗН фотоприемника. Это связано с тем, что даже при незначительном рассогласовании скорости сканирования и периода опроса линейки изображение пятна сдвигается относительно площадки, с которой проводится интегрирование и суммирование сигналов в режиме ВЗН. Так, если число элементов суммирования составляет 10 и расстояние между центрами соседних площадок одного ВЗН канала составляет 3 периода дискретизации изображения, то расстояние между центрами первого и последнего элементов ВЗН канала составляет 27 периодов дискретизации. Если рассогласование скорости сканирования и периода опроса линейки составит $1/27$, т.е. 3,7%, то начало интегрирования фототока в каждом последующем ФЧЭ будет начинаться при положении пятна, смещенном относительно первого ФЧЭ в канале, так что на последнем элементе начало интегрирования будет соответствовать положению центра пятна на границе ФЧЭ. Проинтегрированный сигнал от последнего ФЧЭ будет примерно в 3 раза меньше, чем с первого при условии совпадения центра пятна с центром первого ФЧЭ. Суммарный ВЗН сигнал при этом составит примерно 0,66 от значения при полной синхронности скорости сканирования и периода опроса линейки ФЧЭ. Таким образом, для того, чтобы уменьшение сигнала не превышало 10%, необходимо обеспечить синхронность сканирования и периода опроса не хуже 1%.

Следует отметить, что шумовая составляющая сигнала ФЗН фотоприемника не зависит от положения пятна от точечного источника излучения и скорости сканирования этого пятна, поэтому уменьшение регистрируемого сигнала приводит к соответствующему увеличению порога чувствительности ВЗН фотоприемника при регистрации точечных источников излучения.

1. A.I. D'Souza, at al. Visible to SWIR response of HgCdTe HDVIP detectors. - Proc. SPIE 7298, 72981X (2009)

2. Акимов В.М. Матричные фотоэлектронные модули среднего и дальнего ИК-диапазонов спектра на основе фотодиодов из $Cd_xHg_{1-x}Te$ для инфракрасной аппаратуры нового поколения. - «Прикладная физика», 2005 г. вып.2, с. 7-15.

3. Г.А. Аракелов и др. 256-канальные фотоприемные устройства на основе фоточувствительных структур халькогенидов свинца. - Прикладная физика №6, 2008г.

4. K.-M. Mahlein an al. Next generation IR sensor technology for space applications at AIM. - Proc. of SPIE Vol. 7106 71061J-1, 2008г.

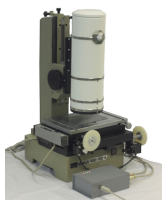
5. Yoanna-Reine Nowicki-Bringuier and Philippe Chorier, "Sofradir SWIR hyperspectral detectors for space applications", Proc. SPIE 7474, 747417 (2009)

6. Папулис А., Теория систем и преобразований в оптике, «Мир», М., 1971

УЗ8 Инфракрасный сканирующий микроскоп с высоким пространственным разрешением

Половинкин В.Г., Базовкин В.М., Курьшев Г.Л., Мжельский И.В.

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия



Инфракрасный (ИК) микроскоп является уникальным средством для исследования температурных полей бесконтактным методом с высоким пространственным разрешением [1]. Поле зрения микроскопа удалось увеличить за счёт использования системы сканирования без потери пространственного разрешения.

Представленный ИК микроскоп выполнен в двух модификациях, которые отличаются типом и материалом фотоприёмного устройства (ФПУ). Матричное ФПУ форматом 128×128 элементов на основе InAs регистрирует ИК излучение в спектральном диапазоне 2,5 - 3 мкм. ФПУ линейчатого типа форматом 384×1 элемент, регистрирует ИК излучение в спектральном диапазоне 3 - 5 мкм.

Для исследования тепловых полей большой площади с высоким пространственным разрешением требуется точная система сканирования исследуемого образца и программное обеспечение для совмещения изображений. Механическая система позиционирования исследуемого образца была взята от оптического микроскопа ИМЦЛ 100×50А и автоматизирована специально разработанной системой управления, выполненной на микроконтроллере. Система управления обеспечивает абсолютную точность позиционирования исследуемого образца 0,3 мкм и высокую скорость его перемещения в 5 мм/с. Практика показала, что такой точности позиционирования достаточно для совмещения изображений без видимых искажений результирующего изображения.

Масштаб изображения может изменяться в пределах 3 – 10 мкм на пиксель, путём смены объектива или изменением расстояния от фокальной плоскости фотоприёмника до объектива.

На рис.1. приведены зависимости температурного разрешения от температуры объекта.

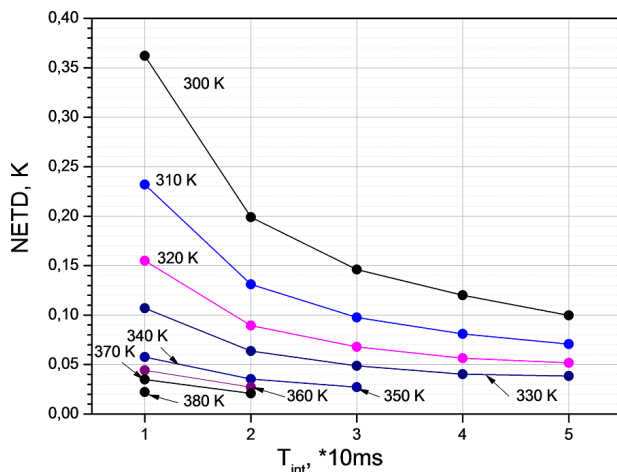


Рис. 1. Температурная чувствительность в зависимости от времени накопления для разных температур объекта.

Экспериментальное измерение с последующей математической обработкой результата показало, что при масштабе 3,55 мкм, минимальное расстояние на котором прибор может различить два объекта, составляет 1,7 мкм.

Такое пространственное разрешение позволяет контролировать дефекты совмещения в микросхемах, собранных методом гибридной сборки, которые невозможно наблюдать в микроскоп видимого диапазона (рис. 2.).

ИК микроскоп является хорошим инструментом для исследований распределений температурных полей в мощных светодиодах видимого диапазона [2] и эмиссии излучения с поверхности ИК светодиодов [3].

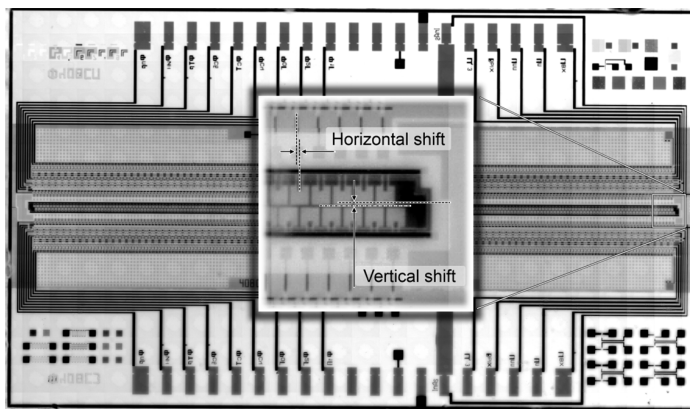


Рис.2. Контроль точности совмещения при сборке гибридных модулей на In микростолбах. Размер модуля 6,5x10,5 мм, размерность изображения 3380x2000 пикселей, пространственное разрешение ~3 мкм, NETD от 25 мК в зависимости от температуры исследуемых объектов. В окне показан увеличенный фрагмент изображения.

Литература

- [1] А.А. Гузев, А.П. Ковчавцев, А.С. Ларшин, В.Г. Половинкин, В.М. Базовкин, Прикладная физика №2 , 2005, с.97-102.
- [2] А.Е. Черняков, А.Л. Закгейм, В.Г. Половинкин, И.В. Рожанский, М.Н. Мизеров, ФТП, 2010, т.44, №3, стр. 390-396.
- [3] С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, И.В. Мжельский, В.Г. Половинкин, М.А. Ременный, А.Ю. Рыбальченко, Н.М. Стусь, Физика и техника полупроводников 2012, том 46, вып. 2.

У39 Использование одноквантовых лавинных фотоприемников в оптических системах обнаружения несанкционированного доступа

Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Тимофеев А.М.

Высший государственный колледж связи, Минск, Беларусь

При передаче информации по волоконно-оптическим линиям связи часто необходимо обеспечить ее конфиденциальность. Поэтому при разработке современных систем волоконно-оптической связи одним из основных требований, предъявляемым к таким системам, является защита передаваемой информации от несанкционированного доступа (НСД). Абсолютная скрытность информации от доступа третьих лиц, которым она не предназначена, может быть реализована путем использования квантово-криптографических методов, которые предполагают передачу каждого бита при помощи маломощных оптических сигналов, содержащих от десятка до отдельных фотонов излучения. Однако современные квантово-криптографические системы связи еще далеки от совершенства и имеют ряд недостатков, основным из которых является малая скорость передачи информации [1], которая, например, может быть достаточной в случае передачи секретных ключей шифрования, но, порой, является слишком низкой для передачи пользовательской информации. В основном низкая скорость передачи информации обусловлена возможностями приемных модулей этих систем, в качестве

которых часто используют счетчики фотонов на лавинных фотоприемниках (ЛФП), поскольку режим счета фотонов является наиболее чувствительным, а применение кремниевых ЛФП – позволяет его реализовать при комнатных температурах [2]. Поэтому целью работы было создать системы связи, содержащие в качестве приемных модулей счетчик фотонов на базе ЛФП, которые бы обеспечивали абсолютную скрытность передаваемой информации, присущую квантово-криптографическим системам связи, и, вместе с тем, имели высокие скорости передачи информации, как современные системы связи, не имеющие каких-либо ограничений по мощности передаваемого оптического сигнала.

Нами были разработаны кремниевые ЛФП со структурой p^+n-v-n^+ и показана возможность их применения в режиме счета фотонов. На их основе построены системы волоконно-оптической связи, которые позволили обнаруживать факт наличия НСД путем измерения ошибки регистрации при приеме информации.

Выполнены исследования зависимости скорости передачи информации от перенапряжения ЛФП при постоянном значении мощности оптического сигнала W и пороговом уровне регистрации $N_n = 2$. Максимуму этой зависимости соответствовало перенапряжение $\Delta U = 0,5$ В. Значение ΔU определялось как разница между напряжением обратного смещения U_n и напряжением пробоя ЛФП $U_{пр}$. Максимальное значение скорости передачи информации C_{max} достигает при значениях ΔU , для которых скорость счета темновых импульсов n_T меньше скорости счета сигнальных импульсов n_c и наблюдается наибольшая разность между скоростями n_T и n_c . Наблюдаемый рост зависимости $C_{max}(\Delta U)$ в диапазоне $-0,2 \div 0,5$ В связан с увеличением квантовой эффективности регистрации счетчика фотонов с повышением перенапряжения. Значительного влияния увеличения скорости счета темновых импульсов в этом диапазоне ΔU на скорость передачи информации не оказывается. При значениях $\Delta U > 0,5$ В увеличение скорости счета темновых импульсов приводит к уменьшению скорости передачи информации. Это связано с тем, что при таких значениях перенапряжения скорость счета темновых импульсов n_T приближается к скорости счета сигнальных импульсов n_c и при дальнейшем увеличении ΔU превышает ее, а квантовая эффективность регистрации с ростом перенапряжения изменяется незначительно, поскольку наблюдается насыщение зависимостей $n_c(\Delta U)$.

Проведены исследования зависимости скорости передачи информации от мощности оптического сигнала W . Измерения выполнены при постоянных значениях N_n и ΔU . Зависимость имеет максимум, наличие которого можно объяснить проявлением эффекта мертвого времени ЛФП, в результате чего часть фотонов излучения не регистрируется. При малых мощностях оптического сигнала этим эффектом можно пренебречь. Однако с увеличением W количество незарегистрированных фотонов растет, что и приводит к уменьшению скорости передачи информации. Поэтому с увеличением W вначале наблюдается рост величины C_{max} , а затем её спад.

Определены зависимости скорости передачи информации от величины порогового уровня N_n для различных мощностей оптического сигнала и постоянной скорости счета темновых импульсов. При проведении исследования были выбраны значения W , для которых эффект мертвого времени не наблюдался. С увеличением мощности оптического сигнала положение максимума зависимости $C_{max}(N_n)$ смещается в сторону больших N_n , а его значение увеличивается. Это связано с тем, что при $n_T \geq n_c$ достаточно большая вероятность ошибочной регистрации символа «1» при наличии на входе системы – «0», и символа «0» при наличии на входе системы – «1», что не позволяет получить высокую скорость передачи данных. С увеличением W скорость счета сигнальных импульсов начинает превосходить скорость счета темновых

импульсов, что приводит к уменьшению вероятности ошибочной регистрации и соответственно влечет рост C_{max} . Отметим, что полученные при измерениях статистические распределения числа смеси темновых и сигнальных импульсов $P_{st}(N)$ и статистические распределения числа темновых $P_t(N)$ имели по одному явно выраженному максимуму и были подобны распределению Пуассона. С увеличением мощности оптического излучения максимальное значение вероятности в распределении $P_{st}(N)$ смещается относительно максимальной вероятности в $P_t(N)$ в сторону больших величин N_n . Поэтому с ростом W увеличивается N_n , при котором достигается максимальная скорость передачи данных.

Выполнены исследования зависимости скорости передачи информации от порогового уровня для различных скоростей счета темновых импульсов и постоянной мощности оптического сигнала. Положение максимума зависимости $C_{max}(N_n)$ определяется скоростью счета темновых импульсов, увеличение которой приводит к смещению максимума $C_{max}(N_n)$ в сторону больших значений N_n .

Получено, что предельно достижимое значение пропускной способности оптического канала связи, в котором в качестве приемного модуля используется счетчик фотонов на базе разработанного ЛФП, при подборе оптимального напряжения обратного смещения ЛФП, мощности оптического сигнала, транслируемого по каналу, и порогового уровня регистрации, составило 80 кбит/с. Это превышает максимальные скорости передачи информации современных квантово-криптографических систем связи [1].

Предлагаемые системы волоконно-оптической связи, содержащие в качестве приемного модуля счетчик фотонов на базе разработанных ЛФП, позволяют обнаружить НСД и получить более высокие скорости передачи информации в сравнении с известными квантово-криптографическими системами связи.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Г11ОБ-043)

Литература

1. *Килин С.Я.* // Квантовая криптография: идеи и практика. – Мн: Белорус.наука, 2007
2. *Гулаков И.Р., Холондырёв С.В.* // Метод счёта фотонов в оптико-физических измерениях. Мн., Издательство «Университетское», 1989

У40 Как выбирать размер пиксела ИК матрицы тепlopеленгатора при произвольной функции рассеяния оптической системы

Винецкий Ю.Р., Герасимов И.В.

Филиал ОАО «ПО УОМЗ» Урал-Геофизика», Москва, Россия

Ранее было показано [1], что при использовании ИК-матрицы как тепlopеленгатора в «смотрящем» режиме (т.е. при неподвижном поле зрения) в условиях, часто имеющих место на практике (равномерный тепловой фон, объекты субпиксельного размера, равномерный спектр совокупного шума канала), условия достижения минимальной пороговой мощности, регистрируемой пикселом матрицы, существенно отличаются от принимаемых традиционно. А именно, в противоположность принятому представлению о том, что в пиксел матрицы оптимального размера должна укладываться подавляющая часть мощности пятна рассеяния точки (ПРТ), в действительности размер пиксела, оптимальный по критерию достигаемого отношения сигнал/шум должен быть таким, чтобы в него укладывалось

приблизительно лишь 30% энергии пятна. Этот вывод основывался на анализе предельного - дифракционно-ограниченного случая, для которого и были получены простые аналитические выражения, описывающие оптимальный размер пиксела x_{opt} в зависимости от дифракционного радиуса r_d ПРТ как $x_{opt} \sim 3/8 r_d$, а также функцию потерь пороговой мощности при размере пиксела, отличном от оптимального.

Вместе с тем открытым оставался вопрос о том, насколько чувствительны сделанные выводы к виду исходной функции рассеяния точки (ФРТ). Кроме того, формулировка результатов в предыдущей работе в терминах дифракционного радиуса затрудняла практическое использование полученных результатов.

Данная работа имеет целью обобщение и распространение ранее полученных результатов на практические ситуации, не ограниченные дифракционным характером ФРТ. Показано, что практически *во всех* употребительных случаях, какой бы не была ФРТ, **рецепт выбора размера пиксела, доставляющего минимум обнаруживаемой мощности, остаётся одним и тем же.** Этот рецепт состоит в нахождении такого значения r_0 на графике зависимости $E(R)$ энергии пятна рассеяния, заключённого в круге с радиусом r , при котором функция $E(r)/r$ имеет максимум. Далее оптимальный размер пиксела и функция потерь формулируются в терминах найденного r_0 , тем самым становясь независимым от конкретного вида ФРТ. Показано, что ошибки оптимизации при использовании такого рецепта незначительны. Излагается методика численных расчётов. Дается физическая интерпретация полученного универсального результата.

1. Ю.Р.Винецкий. Предельные возможности “смотрящей” матрицы в режиме теплорелаксации: оптимальный размер пиксела и ассоциированный инвариант обнаружения / Труды 21-й международной конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. (У-40). Москва, 2010г.

У41 Метод коррекции геометрического шума матричного фотоприемного устройства по сигналам сцены с использованием микросканирования

Ольховая Ю.А., Сапцин В.М.

Кременчугский национальный университет, Кременчуг, Украина

Развитие информационных технологий дало возможность для углубления исследований в инфракрасном и видимом диапазоне длин волн.

Работы по мониторингу, обнаружению и предотвращению, долговременным прогнозам, диагностике, заставили совершенствоваться технологии производства фотоэлектронной аппаратуры, следствием чего явилось их интенсивное развитие.

Реализация затребованных возможностей все в большей степени стала опираться на средства отображения видеоинформации, основу которых на сегодняшний день составляют матричные фотоприемные устройства (МФПУ).

Основной критерий качества работы МФПУ – точность восстановления регистрируемых изображений – определяется уровнем геометрического шума, обусловленного неоднородностью параметров матричного приемника.

Широко используемые на сегодняшний день эталонные источники для коррекции позволяют снизить уровень геометрического шума ниже временного шума [1]. Однако, сложность изготовления эталонов, требование подстройки под интенсивность и спектральный диапазон сигнала сцены, нестабильность МФПУ и необходимость уменьшения габаритов оборудования инициируют поиск и разработку

методов, лишенных указанных недостатков, но с соблюдением соответствующей точности восстановления.

Концептуально меняя подход к подавлению геометрических шумов, авторами предложен метод, обеспечивающий его коррекцию в процессе наблюдения сцены непосредственно по ее сигналам за счет микросканирования [2,3]. Основная идея метода состоит в:

- использовании двумерного малоамплитудного микросканирования;
- применении фрактального алгоритма цифровой обработки последовательности изображений.

Работа фрактального алгоритма основана на иерархии процедур, включающих локальную минимизацию с рекурсией на перемещающемся по матрице шаблоне, с удвоением его линейного пространственного масштаба и соответствующими усреднениями при переходе к следующему уровню иерархии. Алгоритм позволяет построить ряд из M возрастающих по точности решений, в котором первыми восстанавливаются наиболее высокочастотные пространственные гармоники геометрического шума, последними - низкочастотные. Общее число арифметических операций алгоритма $\sim 100N^2$, т.е. линейно зависит от числа ФПЭ. Структура алгоритма позволяет для систем реального времени в конвейерном режиме вести параллельную обработку регистрируемых изображений с использованием матрицы процессоров, общее число которых по порядку величины может достигать $\sim N^2$. При этом каждый из процессоров выполняет операции алгоритма для определенной группы приемников.

Смысл микросканирования заключается в смещении сцены относительно матрицы фотоприемных элементов (ФПЭ) и регистрации соответствующей последовательности кадров, что обеспечило попадание потоков одних и тех же участков сцены на соседние элементы МФПУ. По полученным реакциям ФПЭ рассчитываются матрицы коэффициентов вертикальных и горизонтальных связей для соседних пикселей. Применяя фрактальный алгоритм, получаем корректирующие коэффициенты чувствительности и смещения для всей матрицы ФПЭ.

Для повышения качества восстановления изображения в случае большего динамического диапазона и необходимости более точного учета мультипликативных коэффициентов, осуществляем сдвиг сканера по определенному закону – на один пиксел вправо-влево, вниз-вверх, до и после смещения на радиус пространственной корреляции.

Разработанное программное обеспечение (ПО) для моделирования коррекции неоднородности МФПУ по сигналам сцены с использованием микросканирования позволило получить результаты, которые представлены статистическими оценками и критерием качества PSNR (peak signal-to-noise ratio) в табличной и графической формах [4].

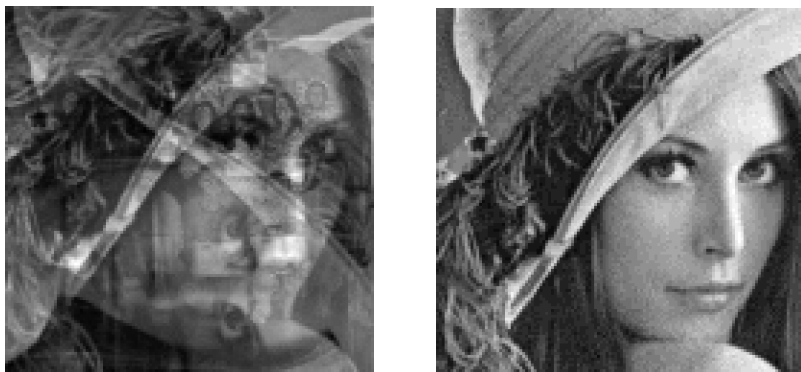


Рис.1 – Исходное изображение и результат коррекции

Разработанный метод коррекции неоднородности позволяет снизить уровень геометрического шума до уровня временного шума, о чем говорят результаты моделирования, которые соответствуют теоретическим оценкам зависимости точности метода от характеристик сцены.

Проведен анализ зависимости точности восстановления изображения от контрастности сцены и режимов движения сканера.

Опытным путем определен диапазон разброса параметров МФПУ, для которого предложенный метод является эффективным.

Литература

1. Полунеев В.В., Болтарь К.О., Рудневский В.С. Исследование корректируемости МФПУ на основе фотодиодов из КРТ: 19-я Междунар. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения, М., 2006.
2. Сапцин В.М. К проблеме выравнивания fotocувствительности приемных элементов в тепловизорах с многоэлементными матричными ИК-фотопреобразователями. – М.: ФИАН, 1989. – 35 с. (Препринт Физического института им П.Н.Лебедева АН СССР, №72).
3. Сапцин В.М., Ганжа В.Л. Численное моделирование и оптимизация модуляционной автокалибровки матричных ИК-преобразователей. - Мн.: АНК «ИТМО им. А.В.Лыкова» АНБ, 1993. – 48 с. (Препринт АНК «ИТМО им. А.В.Лыкова» АНБ, № 4).
4. Сапцин В.М. Ольховая Ю.А., Глебов А.А. Коррекция неоднородности в сканирующих матричных фотоприемных устройствах. - Автоматика / Automatics – 2011: XVIII Міжнародна конференція з автоматичного управління, 28-30 вересня 2011р., матеріали. – м. Львів, 2011. – С. 352–353.

У42 Исследование свойств градиентной коррекции неоднородности фотоприемных устройств с микросканированием

^{1,2}Жегалов С.И., ^{1,2}Пиголкина А.М., ^{1,2}Соляков В.Н., ^{1,2}Фетюхина В.Г.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

В статье [1] предложен метод коррекции неоднородности фотоприемных устройств (ФПУ) с микросканированием, который использует попиксельные градиенты

сигналов сцены для формирования скорректированного изображения. В настоящем докладе исследуются свойства такой коррекции неоднородности.

Схему метода градиентной коррекции иллюстрирует рисунок.

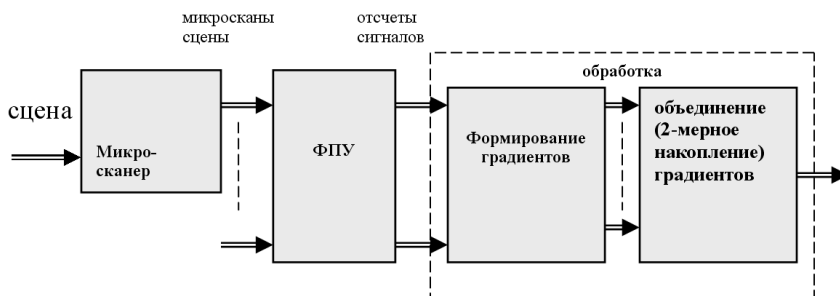


Рис. Схема градиентной коррекции неоднородности

Микросканер сдвигает сцену относительно элементов фотоприемного устройства по направлениям вверх-вниз, влево-вправо и по диагоналям. Сдвиг осуществляется на полпиксела или пиксел.

В общем случае состав сдвигов может быть другим, включать другие направления и может отличаться величина сдвига. Важно, чтобы направлений сдвигов было бы не менее двух, с тем, чтобы реализовать двумерное накопление. Необходимость хотя бы двух направлений сдвигов вытекает из обоснования в [1] – при двух или более направлениях накопление шумов происходит с убыванием их вклада в восстанавливаемое изображение, при одном – с возрастанием.

Рассмотрим само понятие сдвига. Очевидное понимание - сцена сдвигается на пиксел (полпиксела), и с каждым сдвигом производится регистрация кадра.

Расширим это понятие, принимая во внимание, что сдвиги используются для получения градиентов – исходных данных процедуры восстановления изображения.

Так, при моделировании сканирующего ФПУ (4x288), где микросканированием является вертикальный сдвиг сцены относительно линейки ФПУ на полпиксела - этот микросдвиг производится при каждом нечетном прохождении сканера, микросканирование в горизонтальном направлении – по движению сканера, не производилось, а градиент вычислялся как разность соседних отсчетов по горизонтали.

Далее, из пары градиентов – по направлениям вертикали и горизонтали, простым сложением получались градиенты по промежуточным направлениям, и их использование улучшало результат, что подчеркивает чувствительность качества коррекции к количеству и направлениям сдвигов сцены и производных от них конструкций.

В продолжение характеристики свойства укажем следующее. Неоднородность смещений элементов в методе устраняется при определении градиентов – вычитании отсчетов элемента в паре микросканов [1]. В случае же, когда в элементах ФПУ отсутствует неоднородность по смещению, пара сдвинутых микросканов для устранения неоднородности по смещению не является необходимой. Для устранения неоднородности по чувствительности можно использовать пару отсчетов соседних элементов в соседние моменты по времени, взяв отсчеты из следующих друг за другом кадров. Это обусловлено коррелированностью сцены, несвязностью составляющих временного шума в соседних отсчетах между собой и сценой и несвязностью неоднородности элементов со сценой и с шумом. Метод работает так, что при

накоплении сцена восстанавливается. Сложение градиентов дает искомое значение сцены, зашумленное накапливающейся составляющей, в которую входят как неоднородность, так и временной шум. Но так как эти составляющие не связаны со сценой, то результат их накопления случаен и в общем случае не возрастает.

Невозрастанию способствует двумерность накопления [1]. В некоторых случаях возможны искажения, накопление которых возрастает. Такие искажения носят коррелированный, систематический характер, поэтому необходимо их исследование путем моделирования, для поиска возможностей снижения их влияния.

Теоретические оценки [1] получены для достаточно простых моделей шумовых воздействий. Усложнение этих моделей вынуждает упрощать способы оценивания, переходя к приближенным оценкам. Разработанная модель позволяет учитывать различный характер шумов и различные алгоритмы обработки. При этом алгоритм модели по обработке соответствует обработке реальной системы по качеству изображения. Эти два свойства – следование теоретическим оценкам и соответствие практической обработке, делают модель незаменимой для оценивания функционирования цифровой системы.

В качестве критерия сопоставления результатов модели и реальной системы используются корреляционный критерий и критерий отклонения квадрата разности, в расчете на пиксел изображения. Проведено сравнение результатов коррекции по опорным сигналам, корректирование по сцене и градиентная коррекция.

Градиентную коррекцию можно отнести к коррекции по сцене только условно – по признаку, что используются только сигналы сцены. Но сцена подвергается микросканированию и уже обрабатывается не «чистая», а преобразованная сцена. Отметим, что микросканирование и в коррекции по сцене является необходимым инструментом, для получения несмещенных (статистически) коэффициентов для коррекции смещения элементов. При использовании микросканирования - с точки зрения пропускной способности канала наблюдения - требуется избыточность – на каждый выходной кадр необходимо не менее двух отсчетов кадров. Компенсацией служит возможность увеличения разрешающей способности – при, например, полупиксельном сдвиге, а также учет при накоплении градиентов положительного фактора усреднения шумов за счет большего числа используемых кадров. Другой положительный фактор: градиентная коррекция – из-за нечувствительности градиентов к величине сигнала - не требует отслеживания рабочего диапазона сцены, также как и коррекция по сцене, в отличие от корректирования по опорным сигналам.

Добавим, что градиентный метод одновременно исправляет дефекты, не требуя отдельных процедур обнаружения и последующего исправления заменой на уже скорректированные соседние недефектные пиксели.

Градиентный метод обеспечивает монотонное повышение качества коррекции с увеличением числа микросканов и с использованием псевдосканов [1]. Резервом в этом направлении является усреднение результатов после неоднократного применения процедуры накопления, каждый раз начиная ее с другого элемента. В пределе, усреднение с началом во всех элементах приводит к процедуре, которая не использует само понятие начального элемента. Технической задачей на этом пути является объединение в общий накопительный алгоритм процедур с началом во всех элементах.

1. Жегалов С.И., Соляков В.Н., Фетюхина В.Г. «Градиентная коррекция неоднородности фотоприемных устройств с микросканированием», Прикладная физика, 2011, № 6.

У43 Анализ трехпараметрической коррекции неоднородности матричного ФПУ

¹Жегалов С.И., ^{1,2}Соляков В.Н., ^{1,2}Фетюхина В.Г.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

Рассматривается методика и экспериментальное подтверждение возможностей трехпараметрической коррекции неоднородности матричного фотоприемного устройства.

Схему анализа коррекции иллюстрирует рисунок.

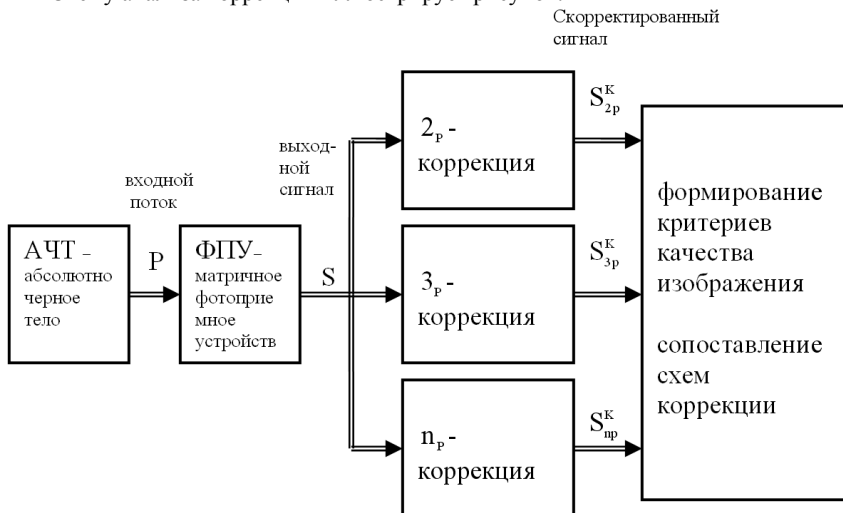


Схема анализа возможностей трехпараметрической коррекции

Исследование проведено для различных температур АЧТ, с шагом 1°C - 5°C и диапазоном от 5°C до 75°C , для времен накопления сигнала $t_{\text{НС}}$ элементами матрицы от 64 мксс шагом до 1024 мкс.

Сигналы S использовались как опорные сигналы - для определения дефектных элементов и корректирующих коэффициентов, и они же корректировались по двух-, трех- и n -параметрическим схемам.

Результаты оценены по критерию соответствия скорректированного сигнала входному, однородному по элементам, потоку. Так как входной поток однородный, то в качестве критерия используем среднеквадратическое отклонение скорректированного сигнала в расчете на один пиксел. Критерий из сигнальной формы - отклонения скорректированного изображения $\sigma_{\text{ск}}$, пересчитывается в температурную - в разрешение по температуре, по схеме,

$$\sigma_{\text{тк}} = \sigma_{\text{ск}} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta S},$$

где ΔT и ΔS - температурный и соответствующий ему сигнальный диапазоны процедуры коррекции.

Схему коррекции определяют две характеристики: n_p - число параметров ($n_p=2$ - двухпараметрическая, $n_p=3$ - трехпараметрическая, и более) и n_r - количество

температурных точек, используемых для определения корректирующих коэффициентов, $n_T \geq n_p$. Тогда (n_p, n_T) означает n_p -параметрическую коррекцию по n_T точкам.

Основные анализируемые схемы – это $(2_p, 2_T)$ и $(2_p, n_T)$, $n_T > 2$ – для двухпараметрической коррекции, и $(3_p, 3_T)$ и $(3_p, n_T)$, $n_T > 3$ – для трехпараметрической. Схема $(3_p, 3_T)$ рассматривается и в варианте $((2+1)_p, 3_T)$ – коррекция по двум параметрам с подправкой по третьему. Заметим, что $(2_p, 2_T)$ – коррекция – это традиционная двухточечная коррекция.

Рассмотрена еще одна схема коррекции – кусочно-линейная, идея которой следует из аналогии с кусочно-линейной аппроксимацией. Эту коррекцию обозначаем $(n_p, n_T/2)$. Обозначение подчеркивает разбиение T температурных точек на пары соседних точек – каждой паре соответствует интервал. Так, $(2_p, 3_T/2)$ – коррекции соответствуют 2 температурных интервала, с традиционной двухточечной коррекцией в каждом.

Исследованы варианты коррекции с количеством параметров $n_p > 3$, но заметного улучшения качества коррекции в сравнении с 3_p -коррекцией не достигнуто.

Помимо анализа конечного результата – скорректированного изображения S^K , в работе исследовалось и нескорректированное – S , для выяснения связи температурной нелинейности потока P с нелинейностью характеристик элементов. Разделение возможно по следующим причинам. Процедура коррекции работает по сигналам S и чувствительна к их неоднородности, независимо от ее происхождения. Последнюю в целом «создают» отличия характеристик элементов между собой вкуче с неоднородностью входной сцены. Поэтому достаточным для разделения нелинейностей является межэлементная однородность калибрующего потока, и тогда в выходном сигнале остается только одна – неоднородность элементов, и она становится объектом коррекции. Так как исправляется неоднородность элементов, а она порождается в том числе и различием в нелинейности характеристик элементов, то эти различия устраняются, но общая для элементов нелинейность останется.

Выводы:

- представлена методика оценки вариантов коррекции неоднородности матричных фотоприемных устройств;
- проведены эксперименты с матричным ФПУ 256x320, которые подтвердили положения методики и показали, что трехпараметрическая коррекция улучшает качество изображения в сравнении с двухпараметрической;
- увеличение числа параметров выше трех не дает заметного улучшения, а в ряде случаев наблюдается ухудшение;
- причина ухудшения состоит в чувствительности процедуры коррекции к способу получения корректирующих коэффициентов – по средним оценкам или с использованием дисперсий, и в чувствительности к сложности процедур корректирования;
- общая тенденция следующая: устойчивы процедуры коррекции с использованием средних и с невысокой сложностью корректирования.

У44 Несканирующий тепловизионный прибор на основе линейчатых ФПУ на спектральный диапазон 3...5 мкм

^{1,2}Вегтемягин С.А., ^{1,3}Лазарев П.С., ¹Полесский А.В., ^{1,2}Сидорин А.В., ^{1,3}Соляков В.Н.,
^{1,3}Тренина Е.О., ¹Юдовская А.Д.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³ МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

Одним из наиболее эффективных методов дефектоскопии является метод теплового контроля поверхности объектов, осуществляемый с помощью термографической аппаратуры.

Стоимость современных термографических приборов очень высока из-за использования как дорогостоящей элементной базы (охлаждаемых матричных и линейчатых фотоприемных устройств, неохлаждаемых микроболометрических матриц с блоками цифровой обработки), так и сложных оптико-механических узлов (объективов, сканеров).

В случаях, когда объекты наблюдения движутся, например, для конвейерного производства, контроля подвижного состава, применение простых термографических датчиков на основе элементной базы невысокой стоимости - линейчатых фотоприемных устройств из халькагенидов свинца и простых оптико-механических узлов модульной конструкции и серийных электронных и цифровых блоков позволяет создать недорогой прибор.

Во ФГУП «НПО «Орион» для решения подобных задач был создан термографический датчик на основе серийно изготавливаемого фотоприемного устройства ФУР-129Л, который представляет собой однорядную 64-элементную линейку из PbSe. С целью обеспечения чувствительности датчика был специально разработан сверхсветосильный объектив малой стоимости, с относительным отверстием 1:0,7 и достаточно высоким качеством изображения (80% энергии в пятне размером 40 мкм). Объектив состоит из трех кремниевых линз с пологими сферическими поверхностями, что позволяет значительно уменьшить его стоимость и прибора в целом.

Основные характеристики термографического датчика приведены в таблице 1. А его внешний вид на рис. 1.

Таблица 1. Основные характеристики прибора

Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение	Значение
1. Спектральный диапазон мкм		3,5...4,8
2. Поле зрения в вертикальном направлении, град		15,3
3. Мгновенное поле зрения мрад		4
4. Пространственное разрешение в направлении перпендикулярном направлению движения объектов, пикс, не менее		64
5. Температурное разрешение, К	NETD	0,15
6. Формат МФПУ		1x64
7. Шаг ФЧЭ, мкм		100
8. Габаритные размеры (без ПК), мм		300x122x200
9. Масса, кг		2,7

Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение	Значение
10. Время выхода на режим, мин	t вых	0,5
11. Напряжение электропитания, В/Гц	U пит	~220/50
12. Потребляемая мощность (без ПК), Вт, не более		12



Рис. 1. Внешний вид прибора

У45 Система обработки информации ультрафиолетового пеленгатора смотрящего типа

Арзамасов Д.И., Вахитов М.А., Добрынин Ю.А., Липатов В.В., Махмутов М.С.,
Музафаров А.Р., Сунцов В.И., Хисамов Р.Ш., Яцык В.С.

ОАО «НПО «ГИПО», Казань, Россия

В последние годы получили развитие пеленгаторы смотрящего типа, работающие в «солнечно-слепом» ультрафиолетовом (УФ) диапазоне спектра. Наиболее распространенной схемой построения оптико-электронного регистратора в таких приборах является использование электронно-оптического преобразователя (ЭОП) и сопряженного с ними матричного приёмника излучения. Один из таких УФ пеленгаторов (УФП) был разработан в ОАО «НПО ГИПО».



Рисунок 1. Различные варианты исполнения УФ пеленгатора

Для выделения УФ сигналов, усиленных и преобразованных ЭОП в сигналы видимого излучения, в пеленгаторе был использован электронный блок системы обработки информации, включающий: матричный фотоприемник, состыкованный с выходным окном ЭОПа через проекционный объектив; блок предварительной обработки сигналов матрицы (плата датчика изображения); центральный вычислитель.

Матричный фотоприёмник LUPA-300 при формате 640×480 пикселей работает в оконном режиме с уменьшенным форматом – 272×272 пикселей. В фотоприёмник встроены 4 аналого-цифровых преобразователя (АЦП), считывающие сигналы 4-х смежных столбцов с частотой выборки до 20 МГц, при этом их цифровые выходы мультиплексируются на одну выходную шину, обеспечивая частоту выборки до 80 МГц. Рабочая скорость считывания достигает 300 кадров в секунду.

Плата датчика изображения (ПДИ), реализованная на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС MAXII EPM1270G), осуществляет передачу сигналов управления в фотоприёмник, ЭОП, контрольные излучатели и выполняет функции фильтрации и буферизации данных при передаче видеосигналов в оперативно запоминающее устройство вычислителя. Дополнительно плата содержит схемы встроенной системы контроля (ВСК), которые отслеживают напряжения, токи, температуры различных узлов изделия. Внешний вид платы с проекционным объективом показан на рисунке 2.

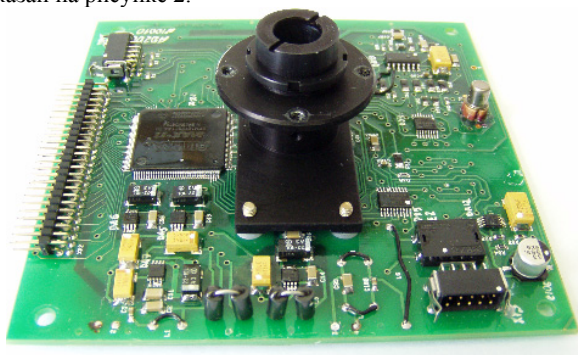


Рисунок 2. Плата датчика изображений.

Рассматривались различные варианты исполнения ПДИ, в том числе и с интегрированной памятью CY7C1380D объемом 18 Мбит. Наличие внешней памяти позволяет существенно расширить вычислительные возможности платы. Однако недостаточность вычислительной мощности ПДИ для выполнения всех этапов

обработки последовательности видеок кадров потребовала использования вычислителя на базе мощного сигнального процессора TMS320C6416 – модуля SPM186420HR стандарта PCI-104. Применение этого модуля, помимо прочего, упростило стыковку с датчиками, не связанными с ПДИ, а так же стыковку с модулями, выполненными в стандарте PC/104 реализующими внешние интерфейсы обмена информацией с системой управления и с другими УФП комплекса (Ethernet, Манчестер (MIL-STD-1553B)).

Схемы обработки, реализованные в вычислителе, обеспечивают компенсацию постоянной составляющей и разброса чувствительности пикселей, корректировку неисправных отсчетов, пороговую обработку, регистрацию единичных фотоэлектронных событий, формирование списка координат событий, формирование кадров накопления с программной компенсацией эволюций носителя, селекцию по амплитудным, временным и размерным признакам, определение угловых координат целей, присвоение и удержание номера цели. Кроме того, вычислитель отвечает за анализ многоуровневой системы ВСК изделия.

В настоящий момент проводится разработка процессорной платы, позволяющей повысить вычислительные возможности изделия при одновременном устранении избыточности ряда модулей (тем самым, улучшив габаритно-массовые характеристики) и отказа от модулей иностранного производства.

У46 Интеллектуальный радиометр ультрафиолетового излучения Тензор-31М

¹Добровольский Ю.Г., ¹Шабашкевич Б.Г., ¹Юрьев В.Г., ²Воробец Г.И., ²Кузь М.А.

¹ Научно-производственная фирма «Тензор», Черновцы, Украина

² Черновицкий национальный университет, Украина

НВФ "Тензор" совместно с Черновицким национальным университетом им. Ю.Федьковича разработан радиометр-дозиметр ультрафиолетового (УФ) излучения Тензор-31М.

Конструктивно новый прибор является развитием схемотехнических решений, разработанных для радиометра УФ излучения Тензор-31 [1, 2] и дозиметра УФ излучения Тензор-53 [1, 3].

Прибор состоит из двухканальной радиометрической головки УФ диапазона с комплектом светофильтров, преобразователя ток-напряжение, усилителя с регулируемым коэффициентом усиления, мультиплексора, аналогово-цифрового преобразователя, микроконтроллера, жидкокристаллического индикатора и блока кнопок управления.

Внешний вид прибора приведен на рисунке.



Работа прибора построена на усилении аналогового фотосигнала, превращении его в цифровую форму и анализе с помощью микропроцессора. Анализ фотосигнала осуществляется с помощью алгоритма, который учитывает с одной стороны заранее заданные условия, с другой стороны - особенности принятого фотосигнала.

К заранее заданным условиям относятся:

- выбор режима работы (радиометр, или дозиметр);
- выбор измеряемого спектрального диапазона (А, В, С, бактерицидный, эритемный, видимый);
- выбор измеряемого источника УФ излучения (ртутный, дейтериевый, дуговой, видимый, источник потребителя);
- коррекция нулей (самокалибровка прибора);
- установка коэффициентов выравнивания фотосигналов по двум каналам (опорному и рабочему фотодиодам);
- установка коэффициента, учитывающего отличие спектральной характеристики чувствительности реальной радиометрической головки от идеальной (отличие от П-образности);
- установка коэффициента, учитывающего отличие спектра измеряемого от спектра, излучения, по которому калибруется прибор.

Анализ принятого фотосигнала и его обработка осуществляются с помощью специализированного программного обеспечения, которое позволяет:

- обрабатывать принятый фотосигнал с учетом заранее заданных условий;
- корректировать рассчитанные данные путем умножения их значений на поправочные коэффициенты, которые учитывают степень отличия спектральной характеристики чувствительности радиометрической головки от спектральной характеристики источника УФ (видимого) излучения;
- пересчитывать откорректированные значения фотосигнала в единицы измерения энергетической освещенности, или дозы.

Кроме выше отмеченных возможностей, разработанный прибор способен запоминать измеренные значения и может передавать их на компьютер через адаптер на COM или USB порты персонального компьютера.

Разработано также программное обеспечение для работы с измеренными данными, которые переданы на компьютер, а также тестовая программа для выявления недостатков работы прибора.

Технические характеристики разработанного радиометра-дозиметра УФ излучения Тензор-31М приведены в таблице.

Наименование параметра	Измеренные значения
Спектральный диапазон измерения	
для дозиметрии и радиометрии диапазона А, нм	315 - 400
для дозиметрии и радиометрии диапазона В, нм	280 - 315
для дозиметрии и радиометрии диапазона С, нм	220 - 280
для дозиметрии бактерицидной составляющей УФ излучения, нм	220 - 280
для дозиметрии эритемной составляющей УФ излучения, нм	280 - 400
для радиометрии видимого излучения, нм	380 - 780
Диапазон измерения энергетической освещенности, Вт/м ²	10 ⁻⁴ - 200
Диапазон измерения энергетической дозы, Дж/м ²	10 - 1·10 ⁷
Диапазон установления времени набора энергетической дозы, с	от 1 сек. до 100 час.
Пределы основной относительной погрешности измерения, %:	
энергетической освещенности	± 6,1
энергетической дозы	± 6,5
Параметры, которые входят в определение предела основной относительной погрешности измерения энергетической освещенности и дозы:	
погрешность юстировки, %	± 3,8
нестабильность, %	± 0,2
нелинейность энергетической характеристики, %	± 0,1

Таким образом, Тензор-31М является многофункциональным прибором, который позволяет измерять параметры УФ и видимого излучения (интенсивность и дозу), генерированных различными источниками, в шести спектральных диапазонах.

Литература

1. Л. Боднар, Ю. Добровольский, Б. Шабашкевич. Приборы для исследования интенсивности и дозы ультрафиолетового излучения // Метрологія та прилади. 2008. -2. –с10-18.
2. Паспортные данные на радиометр УФ излучения Тензор-31. Электронный ресурс. Режим доступа <http://www.tenzor.ua>
3. Паспортные данные на дозиметр УФ излучения Тензор-53. Электронный ресурс. Режим доступа <http://www.tenzor.ua>

У47 Комплексное исследование обработки синтезированных изображений

¹Богуславский А.А., ²Сидорин А.В., ^{2,3}Соляков В.Н., ¹Соколов С.М., ²Соколов С.С., ^{2,3}Тренин Д.Ю.

¹ *Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, Москва, Россия*

² *ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия*

³ *МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия*

Во многих задачах, особенно в науке и военном деле, важнейшим источником информации является процесс наблюдения. С развитием техники для наблюдения, т.е., регистрации потока лучистой энергии, стали применяться системы на основе оптико-электронной аппаратуры. Возрастающие потребности в регистрации информации, недоступной органам чувств человека, определяют развитие приемных устройств различных спектральных диапазонов: от рентгеновского до радиодиапазона. Совместное их использование позволяет формировать синтетические образы исследуемых объектов.

Синтез изображений, регистрируемых каждым каналом многоканальной (многодиапазонной) информационной системы, является необходимым этапом анализа информации в такой системе. При этом под синтезом понимается не только формирование итогового «суммарного» изображения, но и определение новых признаков, выделение которых возможно только при совместном анализе сигналов нескольких информационных каналов. Возможность фото- и радиометрии позволяет строить измерительные системы с количественным описанием наблюдаемых сцен. Это позволяет приступить к эффективному решению задач обнаружения, распознавания и измерения.

При разработке систем, решающих такие задачи, необходимо комплексное исследование фундаментальных принципов построения алгоритмов обработки многоспектральных изображений. Кроме того, требуется формирование базы данных с описанием спектро-энергетических и геометрических характеристик объектов (признаков образов объектов в информационной системе), которая используется в процессах распознавания объектов на изображениях и сопоставления изображений различных диапазонов.

Технологической основой программно-алгоритмического обеспечения описываемых работ стал комплекс для исследований систем технического зрения с несколькими полями зрения. Комплекс позволяет комбинировать алгоритмы сбора и обработки зрительных данных в конкретных задачах, оставаясь в рамках

унифицированной структуры программного обеспечения, включающей специальную БД, драйверы устройств ввода зрительных данных и средства контроля времени исполнения.

Особенностью описываемых исследований является нацеленность на максимальный автоматизм выполнения операций по сбору и обработке зрительных данных. Такая направленность требует формализации всех алгоритмов и получения количественных значений всех параметров.

В докладе описываются методы работы с исследовательским комплексом, предложен ряд качественных и количественных алгоритмов обработки многодиапазонных изображений, зарегистрированных в видимом, ближнем, среднем и дальнем инфракрасных диапазонах. Среди этих алгоритмов эквализация двумерных и многомерных гистограмм, определение коэффициентов излучения объектов по их тепловому излучению и другие локальные и глобальные алгоритмы.

Приведены примеры наполнения базы данных спектро-энергетическими характеристиками объектов и представлены результаты использования этой базы в задачах классификации объектов. Обсуждаются перспективы работ с описанным комплексом.

У48 Оценка чувствительности неохлаждаемых приемников ИК изображения на основе микрооптомеханических систем с оптическим считыванием

Свидзинский К.К., Фетисов Е.А.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград, Россия

В последние годы активно разрабатываются неохлаждаемые инфракрасные приемники изображения на термочувствительных биморфных микрооптомеханических системах (МОМС) с оптическим считыванием. Чувствительные элементы МОМС образуют рельеф, соответствующий распределению температуры по поверхности приемника под действием инфракрасного (ИК) излучения. Оптическая система считывания (ОСС) в близком к видимому свете передает изображение рельефа на фоточувствительную матрицу, например, кремниевого прибора с зарядовой связью (ПЗС). Биморфные приемники ИК изображения развиваются как альтернатива промышленно освоенным, но дорогостоящим болометрическим матричным ИК приемникам, которые требуют очень сложной совмещенной технологии изготовления микроэлектромеханических систем (МЭМС) и транзисторных мультиплексоров. Благодаря тому, что в матричных МОМС нет активных электронных элементов и электрических соединений, они изготавливаются на основе одной только сравнительно простой МЭМС-технологии, что обещает потенциально низкую стоимость, на один-два порядка ниже, чем цена микроболометрических матриц.

Достигнутый уровень разработок биморфных МОМС характеризуется созданием ИК приемников с эквивалентной шуму разностью температур $NETD = 500$ мК при среднем формате матриц (256x256) [1] и с величиной NETD около 200 мК [2,3] - при малом формате (100x100). Полученные экспериментальные величины NETD почти в сто раз хуже расчетных значений чувствительности МОМС, приводимых самими авторами указанных работ без достаточных объяснений противоречия.

Существенны две причины этого несоответствия. Во-первых, не учитывался вклад в NETD шума, вносимого ОСС и зависящего от числа элементов N_M матрицы МОМС. Во-вторых, в ОСС использовались методы оптической фильтрации с низкой

эффективностью оптического считывания. Анализ показывает, что эти факторы являются определяющими для NETD биморфных матриц с числом элементов $N_M > 1000$, представляющих практический интерес, то есть для большого ($N_M \approx 3 \cdot 10^5$), среднего ($N_M \approx 6 \cdot 10^4$) и даже малого формата ($N_M \sim 10^4$). В то же время, указанные факторы имеют второстепенное значение для образцов с числом элементов ~ 100 и менее, которые и исследовались в большинстве работ.

Выражение для расчета NETD может быть представлено в виде:

$$NETD = H_T^{-1} \left[\langle (\delta T_{in})^2 \rangle + \langle (\delta T_{op})^2 \rangle \right]^{1/2}, \quad (1)$$

Здесь $\langle (\delta T_{in})^2 \rangle$ - суммарная интенсивность температурного шума на термочувствительных элементах МОМС от всех внутренних источников (гермомеханический шум, шум теплового сопротивления МОМС и др.), $\langle (\delta T_{op})^2 \rangle$ - эквивалентная интенсивность внешнего температурного шума ОСС - относительного шума интенсивности (RIN) источника света, а также шума, вносимого флуктуациями в ПЗС. Величина $H_T = \Delta T_I / \Delta T_0$ - коэффициент передачи разности температур ΔT_0 сцены к ΔT_I на термочувствительных элементах. Согласно теоретическим оценкам [4,5], подтвержденным экспериментально рядом работ, внутренний шум в элементе МОМС не превосходит $\sigma_{in} = \langle (\delta T_{in})^2 \rangle^{1/2} = 0,3 \text{ мК}$. Внешний шум считывания определяется путем приравнивания мощности сигнала от флуктуации δT_{op} к интенсивности шума фотоотклика ПЗС. Из сравнения дробового и теплового шума сопротивления R_H цепи считывания ПЗС с учетом того, что полоса частот электронного считывания зависит от числа элементов как $\Delta f = N_M / 2t_k$, где t_k - время кадра, получаем условие для числа элементов матрицы N_M , при котором тепловой шум превосходит дробовой:

$$N_M > N_{RS} = \left(\frac{e}{kTC_1} \tau_0 \kappa P_0 t_k \right)^{1/3} \approx 2 \cdot 10^3, \quad (2)$$

где P_0 - мощность светового источника ОСС. Значение критического размера матрицы N_{RS} получено для следующих величин, входящих в выражение (2): $kT/e = 0,025 \text{ ВВ}$, $\tau_0 = 0,1$ (-10дБ) – общий коэффициент пропускания оптического каскада ОСС, $\kappa = 0,7 \text{ А/Вт}$ – амперваттная чувствительность фотоприемного элемента ПЗС, $C_1 \approx 0,1 \text{ нФ}$ - величина входной емкости цепи считывания заряда в ПЗС, $P_0 \approx 1 \text{ мВт}$. Из (2) следует важный вывод о том, что для матриц всех форматов, кроме тестовых матриц с $N_M < 1000$, тепловой шум значительно превосходит дробовой из-за ограниченной мощности светового источника.

Этот вывод противоречит общепринятому мнению разработчиков матричных МОМС с оптическим считыванием, что преобладание дробового шума характерно для любого формата матрицы, вследствие чего чувствительность приемника слабо зависит от формата. В действительности, интенсивность шума фотоприемника квадратично зависит от числа элементов матрицы:

$$\langle I_T^2 \rangle = 4kT\Delta f / R_H = kTC_1 N_M^2 / t_k^2, \quad (3)$$

где учтено, что нагрузочное сопротивление связано емкостью считывателя C_1 соотношением $R_H = 1/C_1 \Delta f = t_k / C_1 N_M$. Из-за более быстрого возрастания шумового тока с числом элементов, вносимый ОСС эквивалентный температурный шум $\langle (\delta T_{op})^2 \rangle$ в

выражении (1) будет значительно превосходить внутренний шум $\langle (\delta T_{in})^2 \rangle$ и оказывается

$$\langle (\delta T_{op})^2 \rangle^{1/2} = \frac{\sqrt{kTC_1}}{4\pi t_k \tau_0 \kappa P_0} \left(\frac{\lambda}{K_{ZT}} \right) \frac{N_M^2}{\chi_{OR}}. \quad (4)$$

Здесь $K_{ZT} = \delta z / \delta T$ - коэффициент чувствительности биморфной МОМС, где δz - смещение термочувствительного элемента при изменении температуры на δT , λ - длина волны считывающего света. Величина χ_{OR} - коэффициент фазового детектирования температурного рельефа, - безразмерный параметр, характеризующий эффективность оптического считывания, который определяется следующим образом:

$$\chi_{OR} = \frac{1}{P_1} \frac{\delta P_1}{\delta \phi} \tau_\phi = \frac{\lambda}{4\pi P_1} \frac{\delta P_1}{\delta z} \tau_\phi = \frac{\lambda}{4\pi} M_{OZ} \tau_\phi, \quad (5)$$

где $\delta \phi = 4\pi \delta z / \lambda$ - фазовый сдвиг (элемент фазового рельефа) световой волны, отраженной от элемента матрицы МОМС при его сдвиге на δz , P_1 - мощность модулированной световой волны, прошедшей через оптический фильтр с коэффициентом пропускания τ_ϕ , M_{OZ} - коэффициент модуляции в зависимости от смещения термочувствительного элемента.

Величина эффективности считывания χ_{OR} существенно влияет на чувствительность приемника, поскольку шум (4) обратно пропорциональна χ_{OR} . Предельное теоретическое значение $\chi_{OR} = 1$. Для модуляции считывающего света применяются МОМС двух типов - дефлекторного и интерференционного - в сочетании с простыми диафрагирующими фильтрами типа «щели» или «ножа». Как показывают расчеты на основе дифракционной теории, дефлекторные модуляторы, применяющиеся в большинстве разработок, могут обеспечить лишь сравнительно малую эффективность $\chi_{OR} \leq 0,1$. Модуляторы с фильтрами интерференционного типа принципиально могут давать эффективность, близкую к предельной. К сожалению, применяющиеся конструкции таких элементов [5] не совсем удачны и имели лишь $\chi_{OR} \ll 1$. В настоящей работе предлагается применить интерференционные элементы МОМС с ОСС на бипризме Френеля, которая обеспечивает почти полное перекрытие интерферирующих волн и эффективность $\chi_{OR} = 0,8$.

Более чем 10-летний мировой опыт разработок говорит, что к настоящему времени для большинства величин, входящих в соотношение (4) получены значения, которые трудно улучшить в рамках существующей МЭМС-технологии и известного набора доступных и совместимых материалов и компонентов. Это позволяет на основании формулы (1) получить ориентировочную оценку достижимой чувствительности ИК приемника на биморфных МОМС в зависимости от формата изображения. Для определения практических возможностей используются значения величин:

$$kT = 4 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}; \quad C_1 = 10^{-13} \text{ Ф}; \quad \lambda = 0,89 \text{ мкм}; \quad \kappa = 0,7 \text{ А/Вт}; \quad \sigma_{in} = 0,3 \text{ мК}$$

$$\tau_0 = 0,1 \text{ (-10 дБ)}; \quad t_k = 40 \text{ мс}; \quad H_T = 0,03; \quad K_{ZT}/\lambda = 1,0 \text{ К}^{-1}$$

С этими значениями выражение (1) приводится к виду:

$$NETD(\text{мК}) = 33 \cdot \left[\left(\frac{3 \cdot 10^{-10} \cdot N_M^2}{\chi_{OR} \cdot P_0(\text{мВт})} \right)^2 + (0,3)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

Ниже представлены расчетные значения NETD в мК для комбинаций двух «свободных» параметров: $\chi_{OR} = 0,1$ и $0,8$; и $P_0 = 1,0$ мВт и $3,0$ мВт.

Формат, N_M	$\chi_{OR}=0,1;$ $P_0=1$	$\chi_{OR}=0,1;$ $P_0=3$	$\chi_{OR}=0,8;$ $P_0=1$	$\chi_{OR}=0,8;$ $P_0=3$
малый $N_M = 10^4$	14	10,5	10,1	10
средний $N_M = 6 \cdot 10^4$	720	240	90	31
большой $N_M = 2,8 \cdot 10^5$	16000	5200	2000	650

Как видно из таблицы, неохлаждаемые приемники ИК изображения на биморфных МОМС при правильном построении оптической системы считывания с кремниевым ПЗС и использованием повышенной до разумных пределов мощности (1-3 мВт) источника считывающего видимого света для формата $\sim 200 \times 300$ могут обеспечить $NETD \approx 30$ мК, в чем не уступают матрицам микроболлометров, при этом являясь технологически значительно менее сложными.

Работа выполнена в Национальном исследовательском университете «МИЭТ» при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Государственный контракт № 16.426.11.0045.

Литература

1. N. Lavrik, R. Archibald, D. Grbovic, S. Rajic, P. Datskos, Uncooled MEMS IR imagers with optical readout and image processing, Proc. SPIE, Vol. 6542, 65421E (2007).
2. Yufeng Jin, Xiaomei Yu, Yongjun Zheng, Yuejin Zhao, Xiaohua Liu and Liqian Dong, "Development of infrared FPA using bimaterial microcantilever arrays", Proc. SPIE 8191, 819102 (2011).
3. Yan-mei Kong, Rui-wen Liu, Bin-bin Jiao and Da-peng Chen, "Infrared camera based on optical-readout bi-material FPA", Proc. SPIE 8193, 81930X (2011).
4. P.G. Datskos, N.V. Lavrik, S. Rajic. Performance of uncooled microcantilever thermal detectors, Rev. Sci. Instrum., Vol. 75, No. 4, April 2004.
5. Yang Zhao, Minyao Mao, R. Horowitz, A. Majumdar, J. Varesi, P. Norton, J. Kitching. Optomechanical uncooled infrared imaging system: design, microfabrication, and performance, Journal of Microelectromechanical Systems, Volume 11, Issue 2, Apr 2002. Page(s): 136 – 146.

У49 Термомеханическая чувствительность биморфных ИК-сенсоров на основе микрооптомеханических систем

Хафизов Р.З., Фетисов Е.А., Лапшин Р.В., Кириленко Е.П., Анастасьевская В.Н., Колпаков И.В.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград, Россия

Неохлаждаемые биморфные тепловые приёмники с оптическим считыванием на основе микрооптомеханических систем (МОМС) относятся к перспективным приёмникам излучения в ИК-диапазоне. В основе функционирования данного типа устройств лежит термомеханический эффект, в соответствии с которым при изменении температуры происходит изгиб биморфной микроконсоли. Изгиб возникает из-за разности коэффициентов теплового расширения пары материалов, из которых изготовлена микроконсоль. Величина изгиба составляет несколько нанометров при изменении температуры на 1 К.

Поглощающий тепло элемент ИК-сенсора выполнен в виде мембраны субмикронной толщины, термоизолированной от подложки. Мембрана закреплена на биморфных микроконсолях. Термоизоляция обеспечивается вакуумным зазором между мембраной и подложкой, а также конструкцией и подбором материалов микроконсоли. Разработанная конструкция биморфного сенсора обладает высоким термосопротивлением, препятствующим оттоку на подложку теплового излучения, поглощённого мембраной.

В работе представлены результаты измерений термомеханической чувствительности неохлаждаемых биморфных МОМС сенсоров с оптическим считыванием. Цель работы состояла в определении эффективности топологических решений, заложенных в конструкцию сенсоров.

Теплочувствительная мембрана сенсора изготовлена из нитрида кремния путём вытравливания расположенного под ней жертвенного слоя из оксида кремния. Толщина мембраны составляет около 400 нм. Для улучшения доступа травителя к жертвенному слою в мембране предусмотрены отверстия, равномерно распределённые по её поверхности. Мембрана подвешена над поверхностью подложки на расстоянии примерно 500 нм с помощью узких (ширина 8 мкм) микроконсолей. Биморфные участки консолей образованы слоем алюминия, нанесённого на основу из нитрида кремния.

Для снижения влияния термомеханических деформаций, возникающих в мембране в процессе изготовления, в мембрану введена армирующая сетка. Технология армирования мембраны заключается в формировании на поверхности жертвенного слоя канавок. После осаждения слоя, образующего тело мембраны, из этих канавок формируются рёбра жёсткости создаваемой мембраны. Среди конструкций биморфных сенсоров прорабатывались варианты сенсоров с двухплечевыми консолями, которые позволяют скомпенсировать термические деформации, возникающие в биморфных структурах после высокотемпературных технологических операций.

Для измерения термомеханических деформаций ИК-сенсоров использовался растровый электронный микроскоп (РЭМ) JSM-6490LM (Jeol) и оптический профилометр Wyko NT9300 (Bruker). Задание температуры образцов осуществлялось при помощи специального вакуумсовместимого столика МК3 (Deben), имеющего встроенный элемент Пельтье. Указанный столик обеспечивает установку, поддержание и измерение температуры в диапазоне от -25°C до $+150^{\circ}\text{C}$.

Существенным преимуществом методов, выбранных для исследований, является возможность визуального наблюдения за функционированием биморфных МОМС сенсоров. Последующая обработка результатов измерений с использованием анимационных процедур для серии кадров позволяет выявить динамику механических реакций элементов на тепловые воздействия. На рис. 1 представлены микрофотографии МОМС сенсора при двух различных температурах ($T=20^{\circ}\text{C}$ и $T=150^{\circ}\text{C}$). На рисунке хорошо видно, что при комнатной температуре наблюдается диагональная деформация мембраны, которая снимается при нагреве. Нагрев сенсора вызывает подъём мембраны, который количественно можно оценить, измеряя её профиль при различных температурах. Путем определения смещения сенсора δz при изменении температуры на δT , был найден коэффициент термомеханической чувствительности $K_{zT}=\delta z/\delta T$. Результаты измерений представлены на рис. 2 и 3.

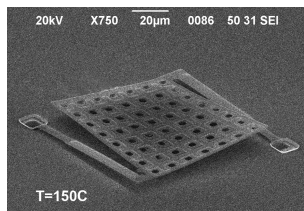
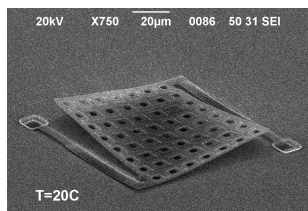


Рис. 1. Биморфный тепловой МОМС сенсор при двух различных температурах. Изображения получены с помощью РЭМ.

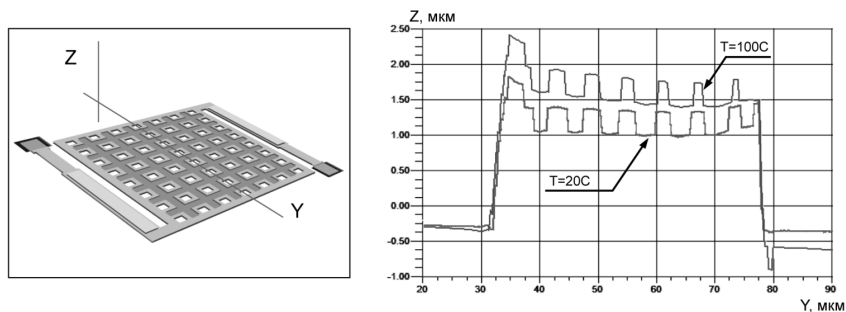


Рис. 2. Положения мембраны биморфного сенсора МОМС при различных температурах.

Измерение профиля мембраны выполнено на оптическом профилемере.

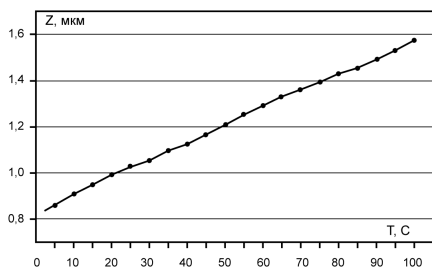


Рис. 3. Зависимость смещения мембраны биморфного сенсора МОМС от температуры.

Коэффициент термомеханической чувствительности $K_{ZT} \approx 7,5 \text{ нм/}^\circ\text{C}$.

В рамках настоящей работы проведены сравнительные измерения различных вариантов конструкции биморфного МОМС сенсора. Полученные результаты позволяют определить наиболее удачные конструктивные решения для создания неохлаждаемых матричных ИК-приёмников с оптическим считыванием.

Работа выполнена в Национальном исследовательском университете “МИЭТ” при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 16.426.11.0045).

У50 Критерии качества охлаждаемых матричных фотоприемников для ИК-области спектра (взгляд разработчика ТПВ)

Балоев В.А., Денисов И.Г., Иванов В.П., Курт В.П.

ОАО «НПО Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

Параметры фотоприемных устройств в конечном счете определяют уровень характеристик современных тепловизионных приборов (ТПВ). В настоящее время коммерческая доступность матричных фотоприемных устройств (МФПУ) ставит в повестку дня вопросы согласования необходимой и достаточной номенклатуры, способов и точности измерения характеристик как ТПВ, так и МФПУ.

В данном докладе на основе опыта выполнения ОКР по разработке ТПВ обсуждаются те характеристики охлаждаемых МФПУ, учет которых крайне необходим при практическом проектировании ТПВ.

Особенностью реализованной на практике процедуры оценки МФПУ является измерение таких характеристик, как чувствительность МФПУ и ее стабильность, после проведения процедуры калибровки. Показано, что если шумы электроники меньше шумов МФПУ, то в диапазоне контрастов рассматриваемых ТПВ объектов до 3 К, результат измерений чувствительности не зависит от способа калибровки.

В докладе рассматриваются следующие основные критерии:

- РТЭШ (при разных временах накопления), после выравнивания;
- Временная стабильность чувствительности (изменение РТЭШ во времени после одной калибровки);
- Дефектные элементы (количество, стабильность);
- Межпиксельная электрическая и оптическая связь.

В зависимости от назначения разрабатываемых ТПВ, требования к значениям параметров будут отличаться, однако рассмотренная минимальная номенклатура параметров позволяет прогнозировать характеристики ТПВ.

У51 Аппаратно-методическое обеспечение определения параметров охлаждаемых матричных фотоприемников для ИК-области спектра

Балоев В.А., Денисов И.Г., Иванов В.П., Курт В.П.

ОАО «НПО Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

В ГОСТ 21934-83 даны определения многоэлементного фотоприемного устройства с разделенными каналами и многоэлементного фотоприемного устройства с внутренней коммутацией. Насколько охлаждаемые матричные фотоприемные устройства (МФПУ) соответствуют этим определениям? На наш взгляд, необходимо дать конкретное определение понятию «охлаждаемый матричный фотоприемник», не допускающее различных, зачастую полярных, толкований и определить перечень основных параметров МФПУ, которые, в том числе, учитывали бы специфику обработки сигналов с него. Возможно, есть необходимость разделить основные параметры по принципу дальнейшего применения МФПУ (тип оптико-электронного прибора, условия эксплуатации, вид окончательного представления информации и т.д.).

По сути, МФПУ являются новым классом фотоприемных устройств, обладающих своими, присущими только им, параметрами и характеристиками, и требующих соответствующего аппаратно-методического обеспечения для

подтверждения соответствия заявленных характеристик реальным значениям. Приведенные в ГОСТ 17772-88 методики и их предлагаемая аппаратная реализация не обеспечивают на требуемом уровне достоверности определения характеристик современных МФПУ.

У52 Пеленгационный потенциал обзорной оптико-локационной системы на основе «смотрящей» ИК-матрицы

Панкин А.Е., Винецкий Ю.Р.

Филиал ОАО «ПО УОМЗ» Урал-Геофизика», Москва, Россия

«Смотрящие» матричные (СМ) ИК фотоприёмные устройства предназначены в первую очередь для использования в тепловидении, но при применении быстройдействующих дефлекторов (сканаторов) можно использовать СМ и для построения широкопольного (обзорного) тепlopеленгатора (ТП), для чего традиционно применяются МФПУ с временной задержкой-накоплением (ВЗН). При построении ТП на СМ матрица продолжает работать в «смотрящем» режиме, а задачей дефлектора является периодическое торможение бега изображения в плоскости фотоприёмника (т.н. «антискан»). Пеленгационный потенциал такого ТП количественно характеризуется *эффективным временем накопления* $T_{int\,eff}$. Последнее определяется как такое время накопления сигнала СМ, работающей в режиме регистрации *неподвижного* изображения, при котором на ее выходе будет наблюдаться то же отношение сигнал-шум, что и в режиме антискан-компенсации.

В работе представлены теоретические и экспериментальные оценки максимально достижимых значений $T_{int\,eff}$ в интервале заданных темпов обзора пространства и сравнение с теоретическими оценками, выполненными применительно к иным – традиционным способам построения ТП, основанным на применении субматриц с ВЗН-организацией. Рассматриваются факторы, определяющие выбор ключевых компонентов и режимов при рациональном построении ТП на базе СМ и антискан-дефлектора. Описана экспериментальная установка и принцип проведения экспериментов по измерению $T_{int\,eff}$. Для максимизации $T_{int\,eff}$ применялся современный высокодинамичный гальвано-дефлектор QS-30 ф. Nutfield Technology. Регистрация движения линии визирования производилась как с помощью датчиков углового положения зеркал, так и посредством отслеживания светового «зайчика» высокоскоростной видеокамерой. Для управления экспериментом использовались программно-аппаратные средства ф. National Instruments. Для дефлектора был разработан закон управления, оптимизирующий времена переходных процессов. С помощью специальной программы производился расчёт значений $T_{int\,eff}$ на основе зарегистрированного закона движения линии визирования (ЛВ), известной функции рассеяния точки и заданного шага пикселей СМ.

На основании полученных данных даны оценки эффективных времён накопления для базового варианта построения ТП и для альтернативных вариантов - с гипотетической (оптимизированной по формату и шагу пикселей) СМ, а также вариантов с типовыми ВЗН МФПУ. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что построение обзорного ТП на основе системы «СМ+антискан» имеет хорошие перспективы, и в ряде случаев имеет преимущество по отношению к традиционному построению ТП на основе субматриц с ВЗН.

У53 Экспериментальный стенд исследования матричных фотоприемных устройств (МФПУ) «смотрящего типа» инфракрасного диапазона для систем обнаружения

¹Галянтч А.Н., ¹Гибин И.С., ¹Золотцев В.В., ¹Киселев М.В., ²Колесников Г.В.

¹ Филиал ОАО «ПО «УОМЗ» «Урал-СибНИИОС», Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, Россия

Современные технологии производства матричных фотоприемных устройств (МФПУ) «смотрящего типа» инфракрасного диапазона позволяют создавать несканирующие системы различного назначения [1-6].

Паспортные параметры и характеристики выпускаемых МФПУ на основе соединений кадмий-ртуть-теллур (КРТ) соответствуют требованиям, предъявляемым к компонентам систем обнаружения. Для таких систем основной характеристикой, определяющей возможность применения МФПУ, является пороговая облученность от объекта, детектируемая измерительным трактом, состоящим из МФПУ и устройств электронной обработки сигнала.

Величина порогового обнаружения зависит от совокупности причин: методики предварительной обработки сигнала, методики постобработки сигнала, отношения сигнал/шум, неоднородности чувствительности, размера изображения, размера элемента, шага элементов, взаимного влияния элементов, времени экспозиции и т.д. [1]. Самым сложным случаем для обнаружения является отклик системы на изображение объекта субпиксельного размера. Очевидно, что синтез устройств для выполнения таких задач, накладывает дополнительные требования не только на МФПУ, но и на постобработку сигнала: алгоритмы, методики, техническую реализацию [7, 8].

Анализ комплекса параметров МФПУ инфракрасного диапазона «смотрящего типа» и электронного тракта обработки сигналов с МФПУ, показал необходимость создания экспериментального стенда исследования для минимального превышения мощности объекта над фоном.

Для реализации этой цели в филиале ОАО «ПО УОМЗ» «Урал-СибНИИОС» был разработан стенд и методика исследования МФПУ.

Литература

1. Осипов В.В., Пономаренко В.П., Селяков А.Ю. Предельные характеристики новых ИК-матриц на основе HgCdTe// Прикладная физика 1999. № 2.с.15-35.
2. Дмитриев Е. Разработка элементной базы фотоприемных устройств отображения информации//Электроника. 2005. Вып.№ 2 с.74-79.
3. Sensor Fusion// Proc. SPIE. 1988. 931. P.180-185.
4. Волков В.Г., Ковалев А.В., Федчишин В.Г.. Тепловизионные приборы нового поколения// Специальная техника.. 2001. № 6. с.16-21.
5. Липин М.В., Громов А.В. Результаты разработки ряда модульных микрокриогенных систем «Сплит-Стирлинг» для криостатированных ФПУ 1 2 поколений// Прикладная физика. 2007. №2. с.110-119.
6. Ли И.И., Базовкин В.М., Валишева Н.А. и др. Многоэлементные гибридные ИК ФПУ на основе приборов с зарядовой инжекцией. ч.II. Тепловизионные системы с элементами на InAs// Автометрия. 2007. Т.43, №4. с.36-49.
7. Борисова И.В., Горенок В.Н., Ерошкин Р.Э. и др. Обнаружение малоразмерных целей на основе статистического анализа контраста изображения// Наука. Промышленность. Оборона: Тр. VII Всерос. науч.-техн. конф. Новосибирск. НГТУ, 2006. с.96-100

8. Галянтич А.Н., Ермошин К.М., Золотцев В.В. и др. Устройства обработки сигналов с МФПУ ИК-диапазона и формирования тепловизионных изображений// Наука. Промышленность. Оборона: Труды VII Всерос. науч.-техн. конф. Новосибирск. НГТУ. 2006. с.109-112.

У54 Автоматизированный стенд для измерения характеристик Si и Ge фотодиодов

¹Кравченко Н.В., ^{1,2}Лазарев П.С., ¹Полесский А.В., ^{1,3}Семенченко Н.А., ^{1,3}Сидорин А.В.,
^{1,2}Тренин Д.Ю., ¹Хакушев П.Е., ¹Юдовская А.Д.

¹ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

²МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

³МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Одним из важнейших этапов изготовления фотоприемников является процедура проведения приемо-сдаточных испытаний. Она требует высокой квалификации персонала и проведения большого объема измерений фотоэлектрических параметров, например таких, как темновой ток, монохроматическая чувствительность, взаимосвязь и т.д. Часто измерения необходимо проводить на различных длинах волн при комнатной, повышенной (пониженной) температурах. С целью повышения производительности труда и уменьшения влияния человеческого фактора возникла необходимость изготовления автоматизированной установки, способной сократить время измерений и как следствие трудоемкость проведения приемо-сдаточных испытаний.

Разработанный стенд позволяет производить измерение характеристик основных Ge фотодиодов ФД246 и Si *p-i-n* диодов ФД342 различных модификаций.

Структурно установка состоит из трех основных частей: модуля измерения в нормальных климатических условиях, модуля климатических испытаний и блока обработки информации, выполненного на основе персонального компьютера и стандартных плат ввода сигнала.

Измерение параметров фотодиодов на различных длинах волн обеспечивается за счет использования лазерных излучателей на длины волн 0,9 мкм, 1,06 мкм и 1,55 мкм. Минимальная длительность импульса лазерного излучателя составляет 100 нс.

В состав блока обработки информации включены платы ввода L-783M (L-card) и ЛА-н10М8-500 (Руднев-Шиляев). Для упрощения работы оператора, а также уменьшения времени обработки информации, было разработано специальное интерактивное программное обеспечение (ПО). ПО имеет базу данных фотодиодов, позволяет хранить информацию о предыдущих измерениях, а также задает необходимый режим работы лазерных излучателей. Внешний вид стенда приведен на рисунке 1.



Рис.1. Внешний вид стенда

Разработанный автоматизированный стенд для проведения приемо-сдаточных испытаний фотодиодов ФД246 и ФД342 позволил сократить в 6 раз времени измерения и обеспечить:

- Автоматическое вычисление параметров;
- Хранение информации об измеренных изделиях;
- Автоматизированную сверку результатов измерений требованиям ТУ;

Стенд имеет соответствующее свидетельство о метрологической аттестации и внедрен в серийное производство.

У55 Новые методологические аспекты исследований излучения структур оптических фонов в диапазоне 0,25-13 мкм

Алленов М.И., Вольвач В.В., Иванов В.Н., Третьяков Н.Д.

ФГБУ «НПО «Тайфун», Обнинск, Россия

В докладе представлены: дальнейшее развитие программы, средства измерений структур оптических фонов, статистические модели различных фоновых ансамблей помех для разработки и применения адаптивных оптико-электронных систем (ОЭС) видения, в том числе и для ночных метеорологических условий наблюдения. Некоторые исходные материалы ранее были опубликованы в монографиях [1-5].

Приведены экспериментальные результаты эволюции и прогнозирования параметров фоновых помех (фоновых сюжетов) при разорванных формах облачности, полученных по статистически обеспеченным трехмерным полусферическим изображениям в диапазоне 8-13 мкм (рис. 1) в виде средних значений флуктуаций энергетической яркости (ЭЯ), дисперсий, спектральных плотностей (распределений дисперсий по пространственным частотам), взаимно-корреляционных функций и других параметров, сечений фоновых полей для различных зенитных и азимутальных углов и общих значений характеристик ЭЯ для всего фонового полусферического поля.

В докладе представлены краткие сведения о параметрах автоматизированных систем регистрации полусферических трехмерных изображений фоновых полей, созданных на основе:

- 1) охлаждаемого приемника излучения CdHgTe
- 2) многоэлементной матрицы.

В первом случае используется радиометр, сканирующая система, обеспечивающая получение фрагмента полусферического изображения фоновое поля, во втором – многоэлементная матрица со сферическим выпуклым зеркалом на входе.

Для сортировки устойчивых признаков распознавания фоновых сюжетов разрабатывается компьютерная программа, которая будет использована в дальнейшей работе.

В докладе кратко обсуждена программа исследований пространственно-временных и энергетических параметров оптических фоновых состояний природных сред, в том числе радиационных, морфологических, фитоактинометрических, агрофизических состояний элементов ландшафта (растительных покровов, почв, водоемов, полей культурных растений, лесных массивов и др.) в дневное и ночное время с высотных сооружений и высотной метеорологической мачты высотой 310 м на полигоне в г. Обнинске, на которой размещены измерительные площадки через каждые 25 м по высоте.

Программа включает в себя решение следующих задач.

1. Анализ факторов, влияющих на оптические характеристики элементов ландшафта.

2. Определение метеорологических условий, в том числе объективное распознавание форм и количества облачности, влияние модулирующих полей облачности на радиационные, пространственные и спектральные характеристики элементов ландшафта.

3. Разработку классификации элементов ландшафта при воздействии на них природных и техногенных факторов, введение коррекции (поправок) на характеристики, полученные авиакосмическими средствами.

4. Создание искусственных малоразмерных элементов ландшафта с различными типами почв, их исследование и эталонирование.

5. Проведение работ по автоматизации спектрорадиометрического комплекса, средств измерений радиационных, фитоактинометрических, морфологических характеристик элементов ландшафта, средств контроля и экспресс-анализа загрязняющих веществ в водоемах на основе регистрации оптических эффектов и моно- и мультимолекулярных ленгмюровских слоев [4].

6. Разработку мероприятий по метрологическому обеспечению средств измерений, проведению регламентных (регулярных) операций по сверке параметров измерительной аппаратуры. Создание каналов для передачи информации заинтересованным потребителям и органам управления.

В докладе приводятся сведения о средствах измерения природных фоновых состояний сред в дневное и ночное время в диапазоне спектра 0,25-13 мкм.

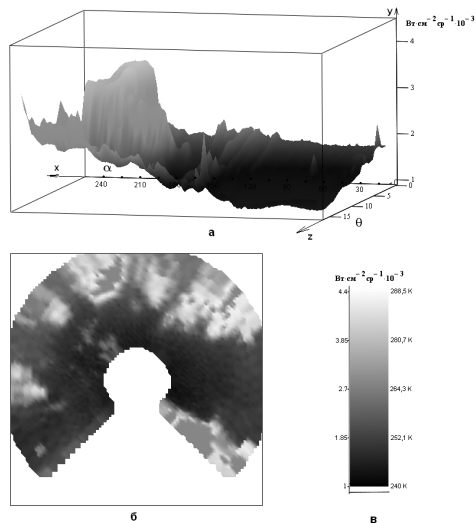


Рис. 1. Пример изображения кучевой (Cu) облачности 3 балла. **а** – трёхмерное представление исследуемой облачности, по оси x – градусы кругового сканирования по альмукантаратам α (от 0 до 260°), по оси y – энергетическая яркость $[\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot 10^{-3}]$, а по оси z – номер строки вертикального сканирования θ (от 30 до 60°). **б** – проекция исследуемого облачного поля на плоскость в декартовой системе координат. **в** – температурная (яркостная) шкала исследуемого облачного поля.

Литература

1. Алленов М.И. Структура оптического излучения природных объектов. – М.: Гидрометеиздат, 1988. – 164 с.
2. Алленов М.И. Методы и аппаратура спектрорадиометрии природных сред. – М.: Гидрометеиздат, 1992. – 262 с.
3. Алленов А.М., Алленов М.И., Иванов В.Н., Соловьев В.А. Стохастическая структура излучения облачности. – С.-Пб., Гидрометеиздат, 2000. – 175 с.
4. Алленов М.И., Бирюков В.Г., Иванов В.Н. Распознавание природных сред, веществ и их загрязнений. – С.-Пб.: Гидрометеиздат, 2004. – 268 с.
5. Алленов М.И. Параметризация природных сред для их распознавания. – Обнинск, 2011. – 180 с.

У56 Методы и средства измерений скорости и направления движения фонового поля на различных высотах в тропосфере

Фёдоров В.О., Алленов М.И., Артюхов А.В., Иванов В.Н., Третьяков Н.Д.

ФГБУ «НПО «Тайфун», Обнинск, Россия

В ФГБУ «НПО «Тайфун» разработана автоматизированная система параметризации и распознавания форм облачности (АСПРФО) [1, 2] которая в отличие от использованных ранее приборов, позволяет в реальном масштабе времени получать по трёхмерным полусферическим изображениям объективную информацию о форме, эволюции и количестве облачности, а также о характеристиках фоновой обстановки, как днём, так и ночью, определять направление, скорость движения и высоту нижней

границы облачного поля по её пространственно-временной структуре собственного излучения в диапазоне спектра 8-13 мкм. Она представляет собой низкотемпературный радиометр, объединенный со сканирующей системой, которая содержит охлаждаемый приемник излучения на основе CdHgTe, который находится в фокусе двухкомпонентного зеркального объектива Кассегрена. Перед объективом установлена маска модулятора и далее модулятор с таким же числом лопастей. Частота вращения модулятора перестраиваемая. Промодулированный сигнал с приемника поступает на предусилитель, масштабный усилитель, двухполупериодный синхронный детектор, фильтр нижних частот и далее на аналоговый вход АЦП платы сопряжения ЛА70М4 с ПЭВМ. Управление шаговыми двигателями сканирующей системы осуществляется персональным компьютером. Обмен командами происходит через цифровые входы (выходы) платы ЛА70М4 и блок управления.

Сканирующее зеркало совершает полный оборот вокруг своей оси за время 1 сек, т.е. полное круговое сканирование по альмукантарату осуществляется за 1 секунду. За это время регистрируется 360 значений энергетической яркости облачного поля через каждый градус. После завершения записи данных, зеркало меняет угол наклона на заданное по программе число минут или градусов, цикл повторяется. Через заданное количество шагов (строк), например 17, сканирующее зеркало возвращается в исходное начальное положение, цикл повторяется и записывается следующий кадр. Таким образом, мы получаем набор матриц, в каждой, из которой 360×17 значений. Каждое из 6120 значений представляет собой конкретную область на небесной сфере. Каждый кадр представляет собой матрицу значений энергетической яркости облачного поля. Затем представляется этот кадр в виде проекции облачного поля на горизонтальную плоскость. На эту проекцию условно накладывается сетка (Патент № 2414728) [3]. Узлам сетки присваивается значение геометрически ближайшего элемента матрицы. Чем больше размерность сетки, тем точнее будет изображение кадра. Максимальная точность ограничивается разрешающей способностью радиометра по азимутальному и зенитному углам. В данном примере выбрана сетка 100×100 ячеек. Скорость облачного поля определяется по двум соседним кадрам (рис. 1) как количественное смещение участка облачного поля (ограниченного рамкой) за известное время получения одного кадра (около 30 сек), также определяется направление этого смещения.

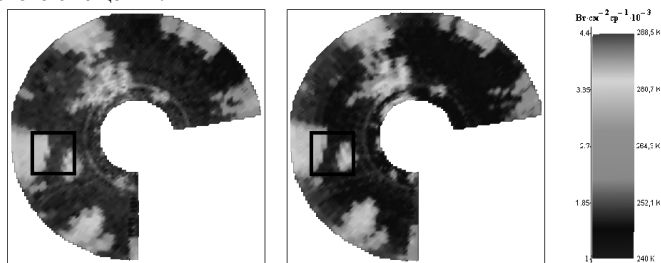


Рис. 1. Два соседних кадра, используемых для определения скорости облачного поля.

Затем кадры разбиваются на слои по энергетической яркости (радиационной температуре). Определяется ячейковая скорость каждого слоя. Для каждого слоя определяется среднее значение энергетической яркости. По этим средним значениям определяется ориентировочная высота каждого слоя согласно стандартной модели атмосферы Земли. По значениям высот для каждой пары слоёв задаётся их высотная разность. По ячейковым скоростям слоёв и их высотной разности с помощью определённой формулы вычисляется высота нижнего слоя для каждой пары слоёв.

Таким образом, удастся получить точную оценку высоты каждого слоя облачности, в том числе высоту её нижней границы. Полученные результаты сравнивались с дневными метеорологическими данными аппаратуры и штатных синоптиков (рис. 2). Ошибка в определении высоты нижней границы не превышает 5 %.

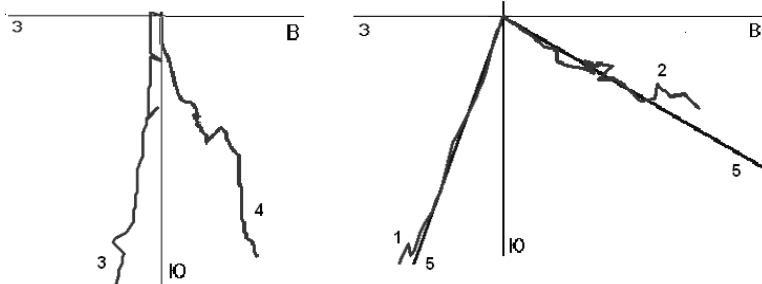


Рис. 2. Примеры определения направления движения облачности.

1-2 – линии векторов движения облачности в дневное время. 1 – 21.09.09 14:00-15:00, кучевая облачность – 6 баллов, вычисленная скорость 8,1 м/с; 2 – 02.06.09 9:20-11:00, кучевая облачность – 5 баллов, вычисленная скорость 10 м/с. 3,4 – примеры определения направления движения в ночное время суток. 5 – направление ветра согласно метеорологическим данным (дневное время).

С помощью АСПРФО представляется возможным вычислить скорость и направление движения облачности, а также высоту её нижней границы на любых высотах и в любое время суток (метеорологические данные облачности ночью в настоящее время не определяются). Таким образом, запатентованное средство измерений и методы определения движения имеют перспективу широкого внедрения в практике.

Литература

1. Устройство распознавания форм облачности: Патент на изобретение №2331853 Россия, *G01J 3/06* / М.И. Алленов, В.Н. Иванов, Н.Д. Третьяков. - Оpubл. 20.08.2008, бюлл. №23.
2. Сканирующий полусферический радиометр. / М.И. Алленов, В.Н. Иванов, Д.Н. Третьяков, Н.Д. Третьяков. // Приборы и техника эксперимента. №5, 2009, с.162 – 163.
3. Способ определения направления и скорости движения нижней границы облачности. Патент на изобретение №2414728 М.И. Алленов, А.В. Артюхов, В.Н. Иванов, Н.Д. Третьяков. - Оpubл. 20.03.2011, бюлл. №8.

У57 Дефектозащищённость в длинных линейках с ВЗН

Володин Е.Б.

ОАО «Ангстрем», Зеленоград, Россия

В докладе изложены принципы построения КМОП СБИС сверхдлинных интегральных линеек с ВЗН, значительно превосходящих по длине размеры максимального модуля, ограничивающего в стандартной КМОП технологии размеры ИС.

При изготовлении таких линеек методом безззорной мультипликации модулей на пластине возникает проблема получения приемлемого выхода годных участков пластины с большим количеством рядом расположенных модулей.

На примере проектирования СБИС безззорной ВЗН линейки длиной 8144 ФЧЭ приводятся основные принципы устойчивости этих СБИС к дефектам как технологическим, так и полученным при эксплуатации от спецвоздействий. В основе этих принципов лежит аппаратная избыточность, присущая методу ВЗН, по которому формирование изображения производится с использованием сканирования каждого пиксела по большому количеству ФЧЭ с последующим суммированием их сигналов. При этом увеличивается отношение сигнала к шуму пропорционально количеству сканируемых ФЧЭ в степени $\frac{1}{2}$.

Второй используемый принцип – «не транспортировать все яйца в одной корзине», т.е. не отправлять все ВЗН-сигналы через один канал обработки, а как минимум через два канала порциями. При негодности одного канала часть информации пройдет через другой канал и сможет быть восстановлена с небольшой потерей в отношении сигнала к шуму.

Если для получения требуемых параметров используется ВЗН по N бездефектным ячейкам, то, введя, например, ВЗН по 2N ячейкам, мы можем построить архитектуру считывания таким образом, что безвредными могут быть N дефектных ячеек. Так как остальные части кристалла слабо изменяются при увеличении N, то вероятность годности кристаллов значительно возрастёт. Следует отметить, что введённый резерв не является пассивным. Он работает. В бездефектном столбце он повышает отношение сигнала к шуму, а в столбце с N дефектами снижает его до допустимого значения.

Было проведено моделирование схемы ВЗН-линейки с цифровыми ячейками, построенной по разработанной дефектобезопасной архитектуре, при разной плотности дефектов на единицу площади. Определено требуемое количество строк ВЗН для различных плотностей дефектов, позволяющее получить с приемлемым процентом выхода годную СБИС линейки длиной 80-100 мм.

Моделирование выполнено Беневоленским Д.В.

У58 Влияние ракурсной зависимости сигнала, отражаемого от воздушного объекта, на оптимальную настройку лазерного дальномера

Винецкий Ю.Р., Титов А.Г.

Филиал ОАО «ПО УОМЗ» Урал-Геофизика», Москва, Россия

В настоящее время в лазерной дальнометрии при обработке высокочастотных эхо-сигналов, отражаемых от воздушных объектов (ВО), эффективную полосу пропускания приемного тракта ФПУ принято согласовывать с длительностью эхо-импульса, соответствующей длительности излучаемого импульса. При таком подходе (считается, что он ориентирован на нулевой ракурс дальнометрируемого воздушного объекта), игнорируется возможное уширение отраженного от объекта сигнала. Из-за этого к полосе пропускания ФПУ предъявляются завышенные требования, что приводит, по сравнению с истинной оптимальной настройкой, к снижению отношения сигнал/шум (ОСШ) относительно потенциально достижимого, возрастанию пороговой мощности принимаемых сигналов и, в конечном счете, уменьшению максимальной измеряемой дальности.

Корректная постановка задачи оптимизации усилителя ФПУ должна включать явный учет многообразия амплитудных и временных параметров отраженных от ВО эхо-сигналов. В данной работе представлены разработанные математические модели приемного тракта лазерного дальномера, учитывающие возможность применения в качестве высокочувствительного фотоприемника как *pin*-, так и лавинных фотодиодов, и позволяющие рассчитать для типовых ВО (самолет, вертолет) форму эхо-сигналов при любом ракурсе объекта. С помощью указанных моделей были “проиграны” ситуации отражения эхо-сигналов для всех возможных ракурсов типовых ВО. При этом для каждого из ракурсов рассчитывалась временная зависимость отклика для всех рассматриваемых настроек тракта, а также вычислялось отношение сигнал/шум на выходе усилителя. Это дало возможность в рамках вероятностного подхода – задаваясь вероятностными характеристиками ракурсно-зависимых параметров ВО - рассчитать распределения вероятности правильного измерения дальности для каждого из исследуемых вариантов ФПУ и настроек приемного тракта.

В результате установлены закономерности выбора оптимальной полосы пропускания усилительного тракта ФПУ в случаях применения *p-i-n* и лавинных фотодиодов. Как правило, оптимальная полоса пропускания оказывается заметно более узкой, чем это следует при игнорировании уширения эхо-импульсов с учетом ракурсных зависимостей. Показано, что при учете эффекта уширения эхо-сигнала выигрыш в величине максимальной измеряемой дальности в практических случаях может составлять более 30%.

У59 Эффективные бинарные методы обработки многоимпульсных эхо-сигналов при лазерном дальнометрировании воздушных объектов

Винецкий Ю.Р., Титов А.Г.

Филиал ОАО «ПО УОМЗ» Урал-Геофизика», Москва, Россия

Предложен простой в реализации, близкий по эффективности к классическому методу оптимальной линейной фильтрации (ОЛФ) метод накопления эхо-импульсов при лазерной локации воздушных объектов, названный методом Синхронного Накопления Послепороговых Эхо-Сигналов (СНПС). В этом методе весь эхо-интервал разбивается на несколько временных подинтервалов – «корзинок», и входящий в каждом эхо-интервале импульс после бинарной пороговой обработки добавляет «единицу» в ту из «корзинок», которая отвечает моменту его прихода. Входным настроечным параметром метода является величина аналогового порога, который устанавливается в дискриминаторе входных импульсов; выходной информацией является распределение степени заполнений по эхо-интервалу «корзинок», содержащих то или иное число единиц, а выходным настроечным параметром – «цифровой» порог - уровень заполнения «корзинки», при котором отвечающий ей подинтервал с необходимым уровнем надёжности (вероятности ошибки первого и второго рода) следует считать истинным интервалом прихода эхо-импульса отклика от объекта.

Дан исчерпывающий математический анализ предложенного метода; представлены зависимости параметров настройки входного и выходного порогов от отношения сигнал/шум, заданных уровней вероятностей правильного обнаружения $P_{но}$ и ложной тревоги $P_{лт}$, числа импульсов в пачке M . Показано, что данный метод как метод накопления имеет «генетическую» связь с классическим методом ОЛФ (эффективность накопления в котором по параметру отношения сигнал/шум есть \sqrt{M} , где M – число повторений). При этом метод СНПС обладает асимптотической

эффективностью $\sqrt{(2/\pi) \cdot M}$, т.е. всего лишь в $\sqrt{\pi/2}$ раз меньшей, чем оптимальный, при этом будучи существенно более простым в реализации: вместо высокоскоростной высокоразрядной обработки его реализация предполагает лишь пороговую обработку и суммирование числа нулей и единиц). Показано, что простые аналитические формулы (асимптотика) позволяют описывать характеристики метода с удовлетворительной точностью вплоть до числа импульсов в пачке $M=4$. Рассмотрено также важное расширение представленного метода обработки послепороговых сигналов, обеспечивающее его эффективную работу в ситуации сближения носителя с дальнометрируемым объектом при том, что скорость последнего является априорно неизвестной. Показано, что предложенный модифицированный алгоритм (названный методом диагонального накопления послепороговых сигналов, или ДНПС) парирует влияние неопределённости скорости сближения с объектом ценой незначительного ухудшения эффективности. Представленные методы и алгоритмы обработки могут быть применены для повышения дальности обнаружения воздушных объектов.

У60 Сравнительный анализ ФПУ смотрящего и ВЗН типа в части основной характеристики и ее особенностей

Певунчиков И.В.

ФГУП «ЦНИИ «Комета», Москва, Россия

У61 К вопросу о передаче размеров единиц энергетической яркости моделям абсолютно черных тел

Алешко Е.И., Курт В.И.

ОАО «НПО Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

В последнее время термин «радиационная температура» в терминологии разработчиков и потребителей ТВП не соответствует его классическому определению. Применяя термин «радиационная температура» подразумевают температуру неких объектов по их излучению в определенных спектральных диапазонах. Эта температура более близка к яркостной. Яркостные температуры моделей абсолютно черного тела (МЧТ) в различных спектральных диапазонах могут отличаться друг от друга даже при высокой излучательной способности МЧТ и его постоянстве по спектру.

Вопрос о выборе спектрального диапазона сличения МЧТ особенно актуален при их применении в области от 3 до 5 мкм.

Проведенные расчеты показали, что если энергетические характеристики МЧТ определяются в широком спектральном интервале (от 0,8 до 40 мкм), а применяется МЧТ для калибровки оптико-электронного прибора (ОЭП), работающего в области спектра от 3 до 5 мкм, то погрешность в предписываемой ему радиационной температуре составит, примерно, 1,5 К.

Передача размеров единиц энергетической яркости и радиационной температуры от первичного эталона нижестоящим средствам проводится с помощью радиометров-компараторов в широком диапазоне спектра.

При проведении сличений МЧТ с высокой неселективной излучательной способностью, несоответствие спектрального диапазона работы поверяемого с его помощью ОЭП спектральному диапазону радиометра-компаратора не вносит

дополнительной погрешности. Если же речь идет о сличениях с МЧТ, для которой неизвестна спектральная характеристика излучения, то сличение следует проводить в той области спектра, в которой работает поверяемый по ней прибор.

Сличение МЧТ в широкой области спектра, в конечном итоге, дает нам право использовать этот излучатель для проверки радиометров и пирометров, работающих по полному излучению.

В свое время выпускался пирометр полного излучения ППТ-142 для диапазона температур от 30 до 100°C (область спектра от 0,4 до 14 мкм). Изменение яркости в этом диапазоне, связано с температурой зависимостью $L \approx aT^{4,01}$. Здесь $a=1,698 \cdot 10^{-8}$, а показатель при температуре равен 4,01 (в законе Стефана-Больцмана $a=1,805 \cdot 10^{-8}$). Достаточно ли приближения к этой зависимости для пирометра ППТ-142, чтобы считать его полным?

В [2] сказано, что в области температур от минус 50 до 300°C сличение должно проводиться радиометрами-компараторами или пирометрами полного излучения.

Но спектральный диапазон пирометра ППТ-142 кончается на 14 мкм (и это для области от +30 до +100°C) и он отнесен к пирометрам полного излучения.

Таким образом, вопрос о длинноволновой границе чувствительности радиометров-компараторов остается открытым в части его реализации, а главное, целесообразности этой реализации.

Литература

1. ГОСТ 28243-96 Пирометры. Общие технические требования.
2. ГОСТ Р 8.566-96 ГСИ. Излучатели эталонные (образцовые в виде моделей абсолютно черного тела для диапазона температур от минус 50 до 2500°C). Методика аттестации и проверки.

У62 Метрологическое обеспечение современных оптико-электронных приборов

Гараева А.И., Курт В.И.

ОАО «НПО Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

Анализ состояния метрологического обеспечения отдельных видов оптико-электронных приборов (ОЭП) показал, что необходима корректировка и развитие существующих схем метрологического обеспечения ОЭП, а по некоторым видам – фактически разработка новой системы метрологического обеспечения.

Разработка соответствующей системы измерения и контроля параметров, включающая в себя выбор оптической схемы, конструкции источников излучения под каждый вновь разработанный ОЭП опять приведет к различным результатам измерений от стенда к стенду, от предприятия к предприятию.

Возможным путем решения проблемы может быть разработка ряда средств измерений и КПА, объединенных по определенным параметрам, например, по диапазонам воспроизведения требуемых единиц физических величин, по диаметру или фокусному расстоянию объектива. Однако этот путь в условиях интенсивного развития оптико-электронного приборостроения является менее гибким, и требует значительных финансовых затрат.

На наш взгляд, наиболее приемлемым является системный подход к решению проблемы создания средств измерений и контроля характеристик ОЭП – разработка

унифицированного ряда средств метрологического обеспечения производства и испытаний оптико-электронных систем различного назначения и базирования

Набор унифицированных модулей средств измерений позволит потребителю оперативно создавать конфигурации средств измерений температурных, световых, энергетических и частотных характеристик в соответствии с требованиями к контролю параметров конкретных типов ОЭП, а также компонент, модулей, сборок и блоков, входящих в состав ОЭП. При необходимости, потребитель может дозаказать отдельные модули или, при наличии базовых монтажных сборок, только их составляющие, что в значительной степени снизит финансовые затраты и сэкономит трудовые ресурсы на переоснащение парка средств измерений.

В целом, необходима координация работ заинтересованных предприятий, которая позволила бы сконцентрировать усилия в части совершенствования существующей системы метрологического обеспечения ОЭП, обеспечения, при необходимости, возможности ее оперативного изменения, что позволило бы снизить затраты на метрологическое обеспечение разработки, производства, испытаний и эксплуатации оптико-электронных приборов различного назначения и базирования.

Уб3 Фотодиоды с повышенной квантовой эффективностью в средней ИК-области спектра (3-5 мкм)

¹Гребенщикова Е.А., ²Старостенко Д.А., ¹Шерстнев В.В., ¹Коновалов Г.Г.,
¹Андреев И.А., ¹Серебрянникова О.Ю., ¹Ильинская Н.Д., ¹Яковлев Ю.П.

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
² ООО «АИБИ», Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время значительное внимание уделяется разработке фотодиодов для средней инфракрасной (ИК) области спектра. Особенностью фотодиодов, работающих при комнатной температуре в диапазоне ($\lambda=3\div 5 \mu\text{m}$), является сравнительно невысокая квантовая эффективность, для увеличения которой применяют различные концентраторы падающего на поверхность фотодиода излучения в виде полусферических линз, параболических отражателей, линз Френеля и т.д. [1]. Однако эти внешние устройства достаточно дороги и громоздки. Известна также флип-чип конструкция фотодиодов для среднего ИК-диапазона, трудоемкая в изготовлении [2].

В докладе будет представлен новый подход к созданию фотодиодов с повышенной квантовой эффективностью за счет многократного переотражения фотонов от криволинейных поверхностей, «встроенных» в фотодиодный кристалл (рис. 1). На примере гетероструктуры InAs/InAsSb/InAsSbP будет показано, что при создании на тыльной стороне фотодиодного чипа криволинейной отражающей поверхности в виде полусферических ямок травления наблюдается повышение квантовой эффективности фотодиодов во всем исследуемом интервале длин волн (3-5) μm (рис. 2). Из рис. 2 (кривая *c*) видно, что чувствительность возрастает в 1,5-1,7 раз по сравнению с фотодиодами с ровной тыльной стороной чипа (рис. 2, кривая *b*) или с поглощающим омическим контактом на ровной тыльной стороне чипа (рис. 2, кривая *a*). Для созданных фотодиодов (с красной границей на длине волны 4,8 μm) токовая монохроматическая чувствительность составила 0,6 А/Вт на длине волны 4,0 μm . Плотность обратного темного тока при напряжении обратного смещения 0,2 В составила величину (4-6) А/см².

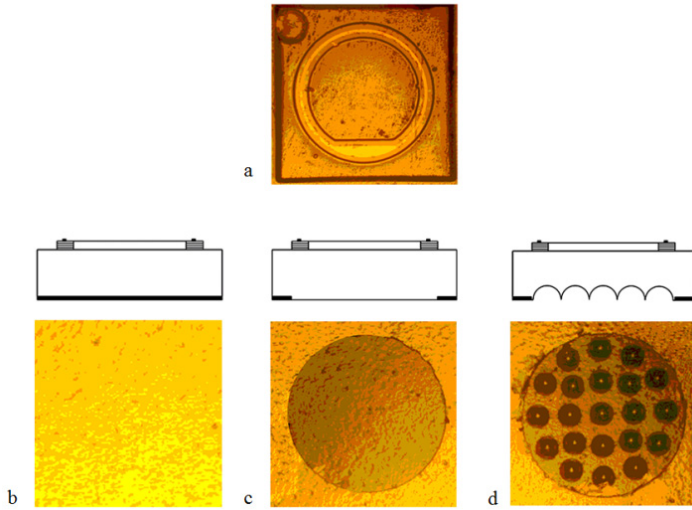


Рис.1, *a* – фото кольцевой мезы, сформированной со стороны эпитаксиального слоя фотодиода; (*b, c, d*) – схемы поперечного сечения и фотографии со стороны подложки трех типов фотодиодных чипов, различающихся по форме контакта к подложке и по рельефу тыльных сторон чипа: *b* – сплошной контакт; *c* – часть тыльной стороны подложки (диаметром 880 μm) свободна от металлизации; *d* – часть тыльной стороны подложки (диаметром 880 μm) свободна от металлизации, заполнена ямками травления в форме полусферы с радиусом 60 μm .

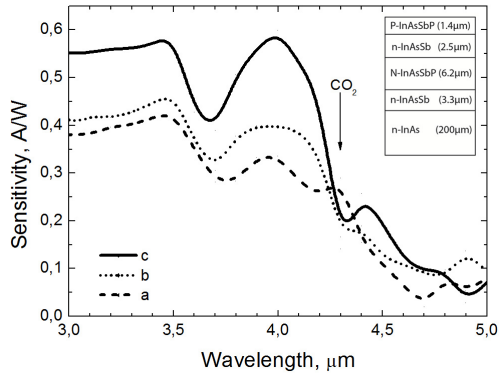


Рис. 2. Токовая монохроматическая чувствительность в зависимости от длины волны для фотодиодов трех типов: *a* – сплошной омический контакт к тыльной стороне чипа; *b* – часть тыльной стороны подложки (диаметром 880 μm) свободна от металлизации; *c* – часть тыльной стороны подложки (диаметром 880 μm), свободна от металлизации, заполнена ямками травления в форме полусферы с радиусом 60 μm . ($T=300\text{K}$). На врезке приведена схема гетероструктуры и толщина слоев.

[1]. M.A.Remennyi, B.A.Matveev, N.V.Zotova, S.A.Karandashev, N.M.Stus, N.D.Ilinskaya. Proc. SPIE, 6585, ISBN: 97 80819467133, 658504; DOI: 10.1117/12722847 (2007).

[2]. Закейг, АЛ; Зотова, НВ; Ильинская, НД; Карандашев, СА; Матвеев, БА; Ременный, МА; Стусь, НМ; Черняков, АЕ, 2009, ФТП, т.43, 3, сс.412-417

Работа частично поддержана программой Президиума РАН №24 «Фундаментальные основы технологии наногетероструктур и наноматериалов», грантами РФФИ 10-02-93110-НЦНИЛ_а, 10-02-00548-а, а также государственным контрактом № 11705.004.11.001 от 16.11.2011 г.

У64 Малоразмерный ИК-фотоприемник со сверхвысокими параметрами фоточувствительности

Исмаилов Н.Д., Гусейнов Э.К., Кулиев Ш.М.

Институт физики НАН, Баку, Азербайджан

Основной областью применения малоразмерных охлаждаемых ИК-фотоприемников является регистрация экстремально слабого излучения, а также формирование теплового изображения в среднем и дальнем ИК-диапазонах. В настоящее время хорошо отработана технология изготовления малоразмерных ИК-фотоприемников на основе узкозонных полупроводников $Cd_xHg_{1-x}Te$, $InSb$, $InAs$ с параметрами фоточувствительности очень близкими к теоретическим пределам [1]. Однако теоретически предельные значения определены для «классических» фотодиодов и фоторезисторов. В данной работе предложена геометрическая модель и рассматривается принцип работы малоразмерного ИК- фотоприемника, который может иметь параметры фоточувствительности, значительно превышающие вышеуказанные теоретические пределы.

Геометрическая модель рассматриваемого фотоприемника показана на рисунке. В подложке p -типа проводимости 1 с размерами освещаемой площадки $A=l \times y$ и толщиной z , создана тонкая полоска n -типа проводимости 2 толщиной t и шириной w , причем $y, z \leq L_e$, а $t, w \ll L_e$ и $t > a$, где L_e - диффузионная длина неосновных носителей заряда в p -области, a - толщина области пространственного заряда (ОПЗ). На концах полоски n -типа проводимости созданы омические контакты 3, посредством которых фотоприемник включается в измерительную цепь.

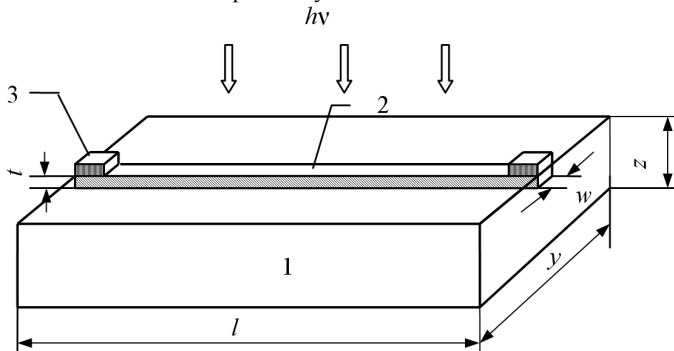


Рис. Геометрическая модель малоразмерного ИК-фотоприемника

При низких температурах, когда сопротивление p - n перехода намного больше сопротивления n -области, проводимость тока осуществляется только по слою n -типа проводимости. При освещении структуры фотоэлектроны, генерируемые в p -области, скапливаются в n -слое, а фотодырки в квазинейтральной p -области. Таким образом, модуляция проводимости n -слоя осуществляется только фотоэлектронами. Наличие рекомбинационного барьера обуславливает большие времена релаксации - τ и значительно уменьшает влияние поверхностной рекомбинации.

Величина вольтовой чувствительности будет иметь вид:

$$R_v = \frac{V_s}{P_\lambda} = \frac{\eta \Phi_s \lambda}{hc} \frac{\tau U_b y}{yl \Phi_s w t n} = \frac{\eta \lambda U_b \tau}{h c l w t n} \quad (1)$$

где поглощаемая монохроматическая мощность $P_\lambda = \Phi_s \lambda h c$.

Это стандартное выражение для вольтовой чувствительности, которая, однако, в $yzt/wt\tau'$ раз превышает значение для однородного фоторезистора с размерами fotocувствительной области $l \times x \times z$ и временем фоторелаксации τ' , вследствие того, что область оптической генерации носителей заряда значительно превышает область проводимости тока, а $\tau > \tau'$.

Если в фотоприемнике преобладают генерационно-рекомбинационные шумы $V_{g-r} > V_j$, то для удельной обнаружительной способности имеем:

$$D_\lambda^* = \frac{R_\lambda}{\sqrt{V_j^2 + V_{g-r}^2}} \sqrt{\Delta f} = \frac{\eta \lambda}{2hc} \left(\frac{\tau \Delta f}{p_n t} \right)^{1/2} \left(\frac{y}{w} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

Если доминирует тепловой шум $V_j = 2\sqrt{kTR}$, то можно получить:

$$D_\lambda^* = \frac{\eta \lambda}{2hc} \frac{V \tau}{l} \left(\frac{q \mu \Delta f}{nkT} \right)^{1/2} \left(\frac{y}{w} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Рассмотрим, какие конкретно параметры fotocувствительности потенциально возможно реализовать для фотоприемника с рассмотренной конфигурацией на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$. При рабочей температуре $T=77$ К длине волны отсечки $11 \mu m$ соответствует $x=0,21$ с $n_i \approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. В качестве подложки обычно используется p -тип с $N_a=10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_h = 500 \text{ cm}^2/V \cdot s$, $\tau_h = \tau_e = 10^{-7} \text{ s}$, $L_e = 8 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$, $l = 10^{-2} \text{ cm}$, $y = 5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$, $z = 2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$. Примем для n -слоя в среднем параметры: $N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_e = 10^5 \text{ cm}^2/V \cdot s$, $\tau_e = 10^{-6} \text{ s}$, $\mu_h = 3 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$ и $t = w = 1 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$. Для низкого уровня фонового излучения $\Phi_b < 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, расчеты показывают, что $\tau = 10^{-5} \text{ s}$, а $V_j > V_{g-r}$, поэтому из формул (1) и (3), при $U_b = 2 \cdot 10^{-2}$, соответственно имеем $R_v = 10^8 \text{ V/w}$ и $D_\lambda^* = 3 \cdot 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$. Для сравнения приведем максимальные экспериментально достигнутые значения [2]: $R_v = 10^6 \text{ V/w}$ и $D_\lambda^* = 1 \cdot 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$.

Таким образом, рассматриваемый тип малоразмерного фотоприемника характеризуется высокими параметрами fotocувствительности и значительно малой потребляемой мощностью. Указанные преимущества, а также существенно малые размеры сечения проводящего слоя, по сравнению не только с диффузионной длиной неосновных носителей, но и с длиной волны излучения, могут значительно расширить область применения рассмотренного фотоприемника.

Литература.

1. Antoni Rogalski. Infrared Physics&Technology. 2002,v.43, p.187-210.
2. Risal Singh and Vardna Mittal. Defence Science Journal. 2003, v.53, №31, p.281-324.

У65 Высокоэффективные быстродействующие GaInAsSb/GaAlAsSb *p-i-n* фотодиоды (полоса пропускания 2-10 ГГц) для спектрального диапазона 1,3-2,4 мкм

Андреев И.А., Дюделев В.В., Ильинская Н.Д., Коновалов Г.Г., Куницына Е.В., Серебrenникова О.Ю., Соколовский Г.С., Яковлев Ю.П.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Созданы и исследованы неохлаждаемые быстродействующие *p-i-n* фотодиоды с мостиковым фронтальным контактом для регистрации коротких импульсов излучения в спектральном диапазоне 1,3-2,4 мкм. Данные фотодиоды позволяют изучать быстропротекающие процессы в физике лазеров, ядерной физике, физике космических лучей, а также могут использоваться в дальнометрии и локации в безопасном для глаза человека окне прозрачности атмосферы, в системах СВЧ коммуникаций по каналам ВОЛС и в открытом пространстве, в системах диодно-лазерной спектроскопии газов и молекул, в медицине и т.д.

Разработан и оптимизирован технологический цикл создания быстродействующих фотодиодов с мостиковым контактом, включающий выращивание на подложке GaSb(100) изопериодных гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb методом жидкофазной эпитаксии, постростовую технологию, корпусирование фотодиодов в СВЧ разъемы для исследования кинетики фотоотклика и измерения полосы пропускания.

Главной конструктивной особенностью фотоприемника с мостиковым контактом является отделение чувствительной мезы от контактной.

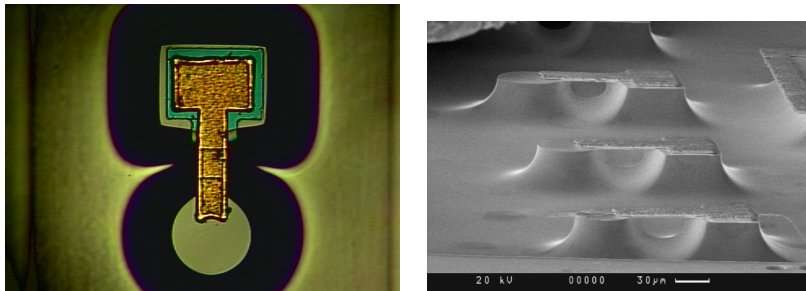


Рис. 1 а) Фотография со сканирующего электронного микроскопа фотодиода с мостиковым контактом. Чувствительная меза (слева) и контактная (справа). б) Фронтальная фотография фотодиода.

На поверхности гетероструктуры были сформированы две мезы, соединенные мостиковым фронтальным контактом. Чувствительная площадка была выполнена в форме круга диаметром 50 мкм, контактная площадка – в форме прямоугольника размерами 50×70 мкм. Тыльный CrAuNiAu омический контакт был нанесен на подложку n-GaSb и выполнен сплошным. Фронтальный омический контакт был сформирован к слою *p*-GaAlAsSb и представлял собой мостик шириной 20 мкм и длиной 85 мкм. Мостик формировался напылением Cr-Au толщиной 2200 Å, и нанесением гальванического Au толщиной 3-6 мкм. Для обеспечения контакта одной стороной мостик заходил на чувствительную площадку на 10 мкм, а другой стороной – на контактную площадку, покрытую диэлектриком. Со стороны контактной площадки

мостик заканчивался прямоугольной частью размером 60×40 мкм. Продольная ось мостика была ориентирована под углом 45° к кристаллическому направлению {110} подложки. Мезы формировались мокрым травлением после нанесения контактов. Мостиковый контакт изолирован от контактной площадки двухслойным диэлектриком толщиной 0,3 мкм, состоящим из слоя анодного окисла толщиной 0,2 мкм и слоя Si₃N₄ толщиной 0,1 мкм. Представлены результаты сравнения характеристик фотодиодов с диэлектриком и без диэлектрика в подконтактной области.

Достигнуто низкое значение собственной емкости фотодиодов: C=2,0-3,0 пФ без обратного смещения и C=0,8-1,0 пФ при обратном смещении U_b=(1-3) В при диаметре чувствительной площадки 50 мкм. Осциллограмма фотоответа приведена на Рис.2 Быстродействие GaInAsSb/GaAlAsSb фотодиодов, определяемое по времени нарастания импульса фотоотклика на уровне 0,1-0,9, составляет величину, $t_{0,1-0,9}$ =90-150 пс. Ширина полосы пропускания достигает 2-10 ГГц. Фотодиоды характеризуются низкой величиной обратных темновых токов I_D=200-1500 нА при обратном смещении U_b=(0,5-3,0) В, высокими значениями токовой монохроматической чувствительности S_I=1,10-1,15 А/Вт и обнаружительной способности D*(λ_{max},1000,1)=9,0·10¹⁰ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2} на длинах волн 2,0-2,2 мкм.

Работа частично поддерживана грантами РФФИ N 10-02-93110-НЦНИЛА, 11-02-00234а.

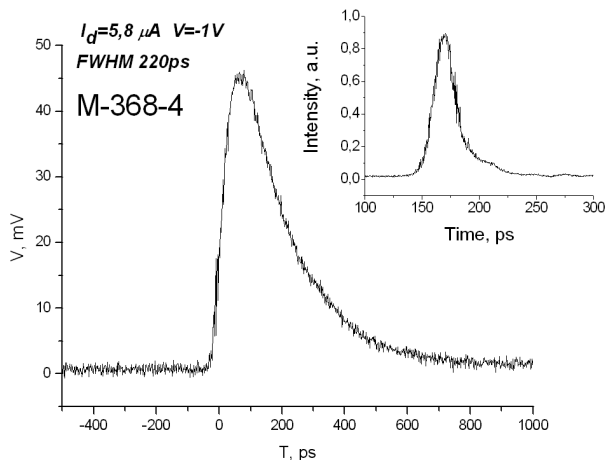


Рис.2. Осциллограмма фотоответа фотодиода при засветке импульсом излучения с λ=1,3 мкм.

У66 Поверхностно облучаемые фотодиоды на основе InAsSb (λ_{0,1} = 4,5 мкм), работающие при температурах 25-80°С

Карандашев С.А., Ильинская Н.Д., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Фотодиоды (ФД), чувствительные в области спектра (3-5 мкм), широко применяются в приборах газового анализа, основанных на измерении пропускания среды в выделенных участках спектра. Для создания таких ФД наиболее часто применяются структуры с твердыми растворами HgCdTe или InAsSb, причем важным преимуществом последнего является стабильность металлургических границ раздела,

что важно для использования ФД в условиях повышенных температур. С увеличением температуры понижение потенциального барьера на p - n переходе сопровождается уменьшением эффективности сбора фотогенерированных носителей заряда в ФД, имеющих контакт ограниченной площади, например в поверхностно облучаемых ФД [1].

В данной работе мы представляем данные о распределении плотности тока и эффективности сбора фотогенерированных носителей заряда, а также приводим анализ зависимости токовой чувствительности S_1 и обнаружительной способности $D^*_{\lambda_{max}}$ от геометрических характеристик контакта в поверхностно облучаемых ФД на основе структур n -InAs/ n -InAsSb/ p -InAsSbP, имеющих длинноволновую границу чувствительности $\lambda_{0,1} = 4,5$ мкм (25°C) при температурах 25 - 80°C .

Образцы изготавливались в виде квадратных чипов размером $0,4 \times 0,4$ мм со сплошным нижним контактом Cr/Au/Ni/Au к подложке n -InAs. Конфигурация верхнего контакта к слою p -InAsSbP из Cr/Au/Ni/Au(Zn) имела четыре модификации: дисковый контакт диаметром ~ 80 мкм в центре чипа и контакты с добавлением сетки, составленной из полосок размером 10×300 мкм разной плотности (см. схемы справа от Рис. 1). При определении чувствительности и расчете обнаружительной способности по формуле Джонса за активную площадь для всех типов образцов принималась площадь квадратной мезы ($0,35 \times 0,35$ мм²). Спектр чувствительности ФД имел максимум на длине волны $\lambda_{max} = 4$ мкм (25°C) и был затянут в коротковолновую область из-за небольшой толщины контактного слоя p -InAsSbP; при повышении температуры λ_{max} возрастала со скоростью $4,8$ нм/К.

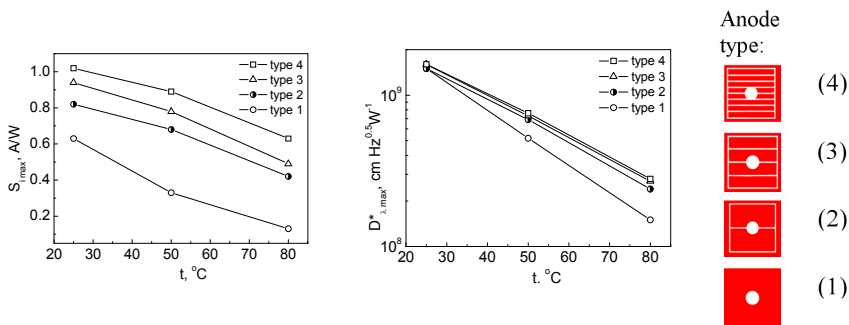


Рис. 1 Температурные зависимости фоточувствительности (а) и обнаружительной способности (б) ФД на основе InAsSb с четырьмя видами контакта к p -InAsSbP (1-4)

Среди факторов, ответственных за уменьшение S_1 с увеличением температуры, представленной на **Рис. 1 а** для четырех типов ФД (1-4), отметим сокращение длины растекания тока и, соответственно, уменьшение коэффициента сбора носителей. Увеличение периметра анода (переход от точечного к развитому контакту) уменьшало величину дифференциального сопротивления в нуле смещения R_o , но повышало чувствительность, что особенно ощутимо при повышенных температурах, при которых увеличение периметра контакта приводило к возрастанию эффективности сбора носителей в 5 раз (80°C). Тем не менее, даже самый развитый контакт (с наибольшим периметром) не обеспечивал полный сбор носителей, поскольку не наблюдалось тенденции к насыщению S_1 при увеличении периметра контакта, т.е. для всех образцов расстояние между соседними элементами контакта было больше длины растекания фототока. Это проявлялось, в частности, в пологих минимумах в распределении интенсивности отрицательной люминесценции в областях между контактами.

Несмотря на падение R_0 увеличение периметра контакта сопровождалось увеличением обнаружительной способности в 1,9 раза до $2,8 \cdot 10^8$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹ при 80°C (см. **Рис.1 б**), что делает перспективным применение ФД на основе InAsSb с развитым анодом.

Литература

[1] Н.Д. Ильинская, А.Л. Закгейм, С.А. Карандашев и др., Физика и техника полупроводников, 2012, т. 46, вып. 5, 708-713.

У67 Оптические свойства гетеросистемы InSb/AlInSb/GaAs

¹Комков О.С., ²Семенов А.Н., ¹Фирсов Д.Д., ¹Пихтин А.Н., ²Иванов С.В.

¹ЛЭТИ, Санкт-Петербург, Россия

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Твердый раствор $Al_xIn_{1-x}Sb$ является оптимальным материалом для барьерных слоев к InSb квантовым ямам, а также буферных слоев при росте структур на подложках GaAs, сильно рассогласованных с InSb по периоду решетки.

В данной работе приведены результаты детальных исследований оптических свойств гетеросистем InSb/ $Al_xIn_{1-x}Sb$ на основе спектров отражения $R(\hbar\omega)$ и пропускания $T(\hbar\omega)$, измеренных на инфракрасном фурье-спектрометре Vertex80 в диапазоне 1-28 мкм при комнатной температуре. Рассмотренные структуры содержат объемные ненапряженные слои InSb и $Al_xIn_{1-x}Sb$, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках полуизолирующего GaAs (100) с использованием буферных слоев AlSb [1,2]. Состав $Al_xIn_{1-x}Sb$, контроль которого осуществлялся методом рентгеноспектрального микроанализа, в различных структурах находится в диапазоне $0 < x < 0,52$ (при $x > 0,6$ данный твердый раствор является непрямозонным). Типичные спектры поглощения $k_\omega(\hbar\omega)$ эпитаксиальных слоев, полученные на основе $R(\hbar\omega)$ и $T(\hbar\omega)$, показаны на рис.1.

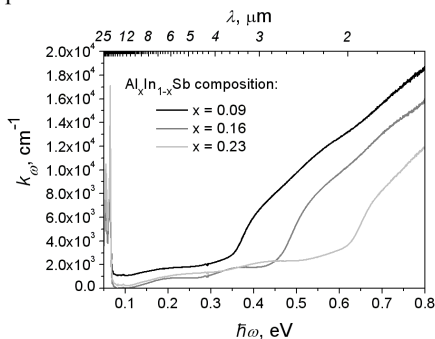


Рис. 1 Спектры поглощения эпитаксиальных слоев $Al_xIn_{1-x}Sb$ различного состава

В спектрах $k_\omega(\hbar\omega)$ отчетливо видна область фундаментального поглощения $Al_xIn_{1-x}Sb$, что позволило определить значения энергии запрещенной зоны E_g для твердых растворов различного состава. При этом было учтено влияние непараболичности зоны проводимости данного материала на форму края поглощения [3]. Сопоставление полученных результатов, а также значения энергии прямого Г-перехода для непрямозонного AlSb [4], с данными о составе растворов позволило получить уточненную зависимость ширины запрещенной зоны E_g от состава x твердого раствора $Al_xIn_{1-x}Sb$:

$$E_g(x) [\text{эВ}] = 0,175 + 2,125x - 0,32x(1-x) \quad (1)$$

Полученная зависимость $E_g(x)$, наряду с соответствующими экспериментально определенными значениями E_g , показана на рис. 2. Величина коэффициента нелинейности $E_g(x)$ составляет 0,32 эВ, что на 0,11 эВ ниже общепринятого значения [5].

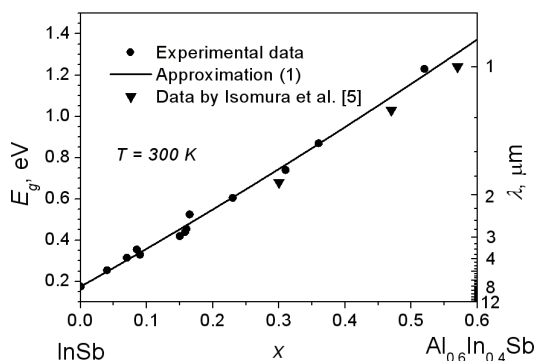


Рис. 2 Зависимость ширины запрещенной зоны $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ от состава

В измеренных спектрах отражения также наблюдалась периодическая картина, вызванная интерференцией света в эпитаксиальных слоях InSb и $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$, что позволило реализовать бесконтактную методику определения их толщины. При расчете показателя преломления слоев $n(\hbar\omega)$ согласно модели, предложенной в [6], была задействована уточненная зависимость $E_g(x)$. Полученные значения толщин продемонстрировали хорошее согласие с независимыми данными растровой электронной микроскопии. Благодаря малой толщине эпитаксиальных слоев интерференционные экстремумы также наблюдались в области фундаментального поглощения слоев, что позволило получить данные о дисперсии $n(\hbar\omega)$ $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ для области $\hbar\omega > E_g$, где традиционные методы определения показателя преломления неприменимы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых учёных – кандидатов наук (МК-3996.2011.8)

1. А.Н. Семенов, Б.Я. Мельцер, В.А. Соловьев, Т.В. Львова, И.В. Седова, М.С. Дунаевский, Т.А. Комиссарова, А.А. Ситникова, П.С. Копьев, С.В. Иванов. Тезисы докладов XXI Межд. Н.-Тех. Конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. 25-28 мая 2010, Москва, РФ.

2. А.Н. Семенов, Б.Я. Мельцер, В.А. Соловьев, Т.А. Комиссарова, А.А. Ситникова, Д.А. Кириленко, А.М. Надточий, Т.В. Попова, П.С. Копьев, С.В. Иванов. ФТП, **45** (10), 1379 (2011).

3. А.Н. Пихтин, Х.Х. Хезази. ФТП, **43** (10), 1301 (2009).

4. S. Adachi. Properties of semiconductor alloys. Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors. / N.Y., WILEY, 2009.

5. S. Isomura, F.G.D. Prat, J.C. Woolley. Phys. Stat. Sol. (b), **65**, 213 (1974).

6. А.Н. Пихтин. А.Д. Яськов. ФТП. **22** (6), 969 (1988).

У68 Схемы считывания для крупноформатных матриц ИК фотодиодов среднего и длинноволнового диапазонов спектра

Рева В.П., Коринец С.В., Сизов Ф.Ф.

Институт физики полупроводников НАН, Киев, Украина

Ограничения, вносимые схемами считывания при регистрации и обработке сигналов матричными приемниками излучения на основе фотодиодов из узкощелевых полупроводников или квантовых ям, во многом определяют конечные параметры фотоприемных устройств среднего (3-5 мкм) и длинноволнового (8-12 мкм) инфракрасных диапазонов спектра. Особенно это проявляется в матрицах формата 320x356, 640x512 и выше. В докладе представлены параметры разработанных и изготовленных схем считывания формата 320x256 и 640x512. Схемы обеспечивают работу матриц ИК фотодиодов в режиме «snapshot» в наиболее используемых фиксированных форматах и в произвольном формате с произвольным расположением «окна». Для работы требуются одно напряжение питания и два импульсных сигнала. Управление схемами осуществляется через последовательный порт. Схема считывания для ИК фотодиодных матриц длинноволнового диапазона формата 320x256 с размерами пикселей 30x30 мкм позволят получать зарядовую емкость порядка $3 \cdot 10^7 e$, уровень шума ниже 3000 e и динамический диапазон более 75 дБ. Архитектура схемы считывания формата 640x512 для ИК фотодиодных матриц средне- и длинноволнового диапазонов спектра обеспечивает работу фотоприемной матрицы в режиме «мгновенной фотографии» (snapshot) и осуществляя считывание информации в двух режимах:

- а) Режиме «интегрирование, затем считывание» (ITR);
- б) Режиме «интегрирование во время считывания» (IWR).

При размере пикселя 25x25 мкм, схема позволяет получать зарядовую емкость порядка $1,3 \cdot 10^7 e$ (ITR), $10^7 e$ (IWR), уровень шума ниже 1000 e , динамический диапазон более 80 дБ.

Для улучшения характеристик и обеспечения тестирования схем считывания при комнатной температуре предусмотрена возможность цифровой подстройки их параметров. Так как площадь кристаллов схем считывания превышает 100 мм², при их проектировании внимание было уделено минимизации влияния разброса физических параметров кристалла (порогового напряжения, подвижности, геометрических размеров) на конечные параметры схем.

Для изготовления схем считывания использовались КМОП технологии с проектными нормами 0,8 и 0,6 мкм.

У69 Анализ методов построения БЭО для МФПУ, и их влияния на шумовые характеристики прибора

^{1,2}Лазарев А.В.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

Проблема квантования аналогового сигнала, является острой и актуальной проблемой современной электроники. В применении к МФПУ (матричным фотоприемным устройствам) проблема квантования заключается в сочетании высокой частоты и высокой точности. Можно достичь высокой точности квантования,

используя современную элементную базу, но есть ряд аспектов, которые не позволяют при этом обеспечить необходимую точность измерений

Ошибка самого сигнала по отношению к падающему потоку. Сам процесс поглощения квантов электромагнитного поля чувствительным элементом является случайным процессом и поэтому имеет свой дробовой шум, из теории вероятности известно, что $U_{\text{шума}} \sim \sqrt{N}$ и $U_{\text{сигнала}} \sim N$, поэтому $U_{\text{сигнала}}/U_{\text{шума}} \sim \sqrt{N}$, где N -количество накопленных электронов. Следовательно, сделать систему, которая сможет измерять точнее этого предела невозможно.

Шум мультиплексора. Любой элемент имеет свой уровень вносимого в систему шума, шум мультиплексора дает принципиально неустранимую погрешность при однократном измерении, следовательно, нельзя измерить сигнал точнее уровня шума мультиплексора.

Влияние коммутационных процессов на достоверность измерений. Классический метод квантования уровня сигнала, предполагает, что коммутационный процесс к концу такта опроса элемента затихает на столько, что им можно пренебречь, и если сделать выборку именно в этот момент то можно получить результат с достаточно низким уровнем шума. Однако при этом собственные шумы мультиплексора остаются принципиально неустранимыми. При мультиплексировании сигнала, разные элементы МФПУ проходят через один и тот же тракт квантования, коммутационные процессы, при мультиплексировании между элементами, имеют достаточно случайный характер, но в силу того, что известны уравнения которые их описывают, и в силу того что случайными являются только параметры которые входят в эти уравнения, можно описать эти ошибки более подробно.

Рассмотрим коммутационные процессы с точки зрения прохождения тока через RLC контур. Для каждого элемента МФПУ и для каждого коммутационного процесса в мультиплексоре будет свое характерное время затухания и характерная частота, но учитывая почти полную симметрию каналов и достаточно близкие параметры RLC от элемента к элементу, можно считать, что переходный процесс представляет собой процесс затухания со случайным отклонением от среднего значения некоего характеристического времени и неким случайным отклонением частоты затухающих колебаний. Решение такого уравнения можно выразить следующим образом

$$U(t) = U_{\text{шума}} e^{-\frac{t}{\tau + \tau_{\text{случайное}}}} \cdot \sin(\omega t + \omega_{\text{случайное}} t + \varphi_{\text{случайное}}) + U_{\text{истинное}} + U_{\text{др.шума}} \quad (1.1)$$

Где $U_{\text{шума}}$ - амплитуда коммутационного процесса в его начале $U_{\text{др.шума}}$ -шум мультиплексора τ характерное время релаксации коммутационного процесса.

Промоделируем данное выражения подобрав из измерений характерные значения переменных и рассмотрим два наиболее часто встречающихся метода квантования подобного сигнала:

Единичная выборка по элементу в конце переходного процесса, пересчитаем среднеквадратичное отклонение по 200 подобным случайным выборкам:

$$\sigma^2 = \sum (U_{\text{расчетное}} - U_{\text{истинное}})^2 / N \quad (1.2)$$

При $U_{\text{расчетное}} = U(t_0) \cdot t_0$ в конце переходного процесса имеем $\sigma_1 = 8,452$

Усреднение по четырем выборкам внутри одного элемента

$$U_{\text{расчетное}} = (U(t_0) + U(t_1) + U(t_2) + U(t_3)) / 4 \quad (1.3)$$

Пересчитав шум, получим $\sigma_2 = 12,362$.

В выражение (1.1) рассмотрим случай четырех выборок на коммутационный процесс, с учетом того что измерения имеют разные погрешности. Погрешность

измерений обусловлена двумя факторами: случайный дробовой шум, и экспоненциальное затухание коммутационных процессов. Так как эти два процесса не коррелированы и в итоговой формуле входят как сумма обеих погрешностей то средняя итоговая погрешность: $\sigma = \sqrt{\sigma_3^2 + \sigma_4^2}$. Заметим что, при оценке погрешностей нельзя опустить ни одну из составляющих, так как $\sigma_3 \gg \sigma_4$ в начале коммутационного процесса и $\sigma_3 \ll \sigma_4$ в его конце. Введем в формулу (1.3) статистический вес для каждого слагаемого и отнормируем среднее значение.

$$U_{\text{расчетное}} = (U(t_0)k_0 + U(t_1)k_1 + U(t_2)k_2 + U(t_3)k_3) / (k_0 + k_1 + k_2 + k_3) \quad (1.4)$$

Статистические веса будем выбирать таким образом, чтобы произведения стат. веса на погрешность измерений была константой. Такой выбор обусловлен тем, что при усреднении разно распределенных случайных величин, дисперсия будет минимальной, если дисперсии их равны. Пересчитав среднеквадратичное отклонение получаем $\sigma = 6.6$.

Коэффициента стат. веса зависят от дисперсии сигнала, в каждый момент времени, зависимость можно выразить как

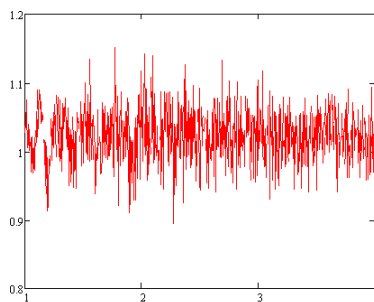
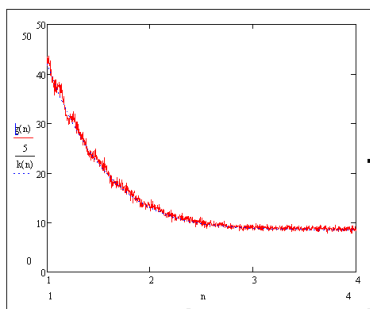
$$k(t) = 1 / \sqrt{A_1^2 + A_2^2 e^{-t/\tau}} \quad (1.5)$$

Пересчитаем зависимость среднеквадратичного отклонения от времени.

$$g(t) = \sqrt{(U(t) - U_{\text{истинное}})^2 / N} \quad (1.6)$$

Рассчитаем $g(t)$ и $k(t)$, как видно из графика они в высокой степени совпадают.

Для наглядности приведем график произведения $g(t) \cdot k(t)$ и видим что он в пределах 10% точно описывает случайные шумы, что при условии 200 выборок является хорошим показателем.



Y70 Design of the high-precision and low-noise driver circuit for infrared focal plane array

Zhiheng Zhang, Zhaomin Guo, Jinpeng Ma

Tianjin Jinhang Institute of Technical physics CASIC, Tianjin, China

The accuracy and noise of driver circuit bias voltage will affect the quality of the infrared focal plane arrays (IRFPA). According to the characteristics and requirements of the noise for infrared detectors, a novel driver circuit for IRFPA was introduced in this paper, which using an adjustable SPI digital potentiometer, so that the bias voltage can be regulated precisely via software within the detector requirement. At the same time, the reference source, low-pass filter, operation amplifier and FET were combined to be optimized, so that the noise

of IRFPA was reduced effectively. The results show that the infrared detector RMS noise is down to 340 μV .

Key words: IRFPA Driver circuit Low-noise

У71 Терагерцовая фотопроводимость в узкозонных структурах на основе твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x < 0,2$)

¹Румянцев В.В., ¹Морозов С.В., ¹Жолудев М.С., ¹Кудрявцев К.Е., ¹Антонов А.В.,

¹Гавриленко В.И., ²Дворецкий С.А., ²Михайлов Н.Н.

¹Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

²Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

Введение

В настоящее время широкое распространение получили фотоэлектрические приемники среднего ИК диапазона на основе твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [1]. Продвижение таких приемников в ТГц диапазон осложняется тем, что при увеличении концентрации ртути возникают флуктуации состава твердого раствора, приводящие к размытию краев зон и их перекрытию, что влечет увеличение концентрации темновых носителей и снижение чувствительности приемника. Появившиеся относительно недавно высокотехнологичные методы роста позволили существенно улучшить качество структур и, кроме того, перейти к подложкам на основе GaAs, более дешевым по сравнению с CdZnTe-подложками. В настоящее время молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) позволяет проводить контролируемое выращивание эпитаксиальных структур $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с высокой однородностью и точностью состава и толщины с *in situ* эллипсометрическим контролем [2]. Для создания фотоэлектрических приемников на основе таких структур необходимо знать спектр чувствительности материала и время жизни неравновесных носителей в зоне, которое определяет не только инерционные характеристики детектора, но и ампер-ваттную чувствительность образцов при заданной подвижности. Информацию о временах жизни фотовозбужденных носителей можно получить при исследовании кинетики релаксации неравновесной фотопроводимости (ФП). В данной работе исследованы спектры и кинетика ФП при температуре жидкого гелия и жидкого азота ряда объемных узкозонных образцов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ и гетероструктур на основе HgTe/CdTe , выращенных методом МЛЭ.

Методика эксперимента

Исследуемые образцы выращивались на полуизолирующих подложках GaAs. Активная часть структур растилась на релаксированном буферном слое CdTe. Параметры образцов приведены в таблице. Образец 101007 был дополнительно легирован индием с концентрацией 10^{14} см^{-3} . Спектры ФП получены с помощью фурье-спектрометра Bruker Vertex 80v со спектральным разрешением 4 см^{-1} . Исследования кинетики релаксации фотопроводимости проводились с помощью прямого метода межзонного фотовозбуждения короткими лазерными импульсами с наносекундным временным разрешением.

Результаты и обсуждение

Во всех спектрах наблюдается широкая полоса фоточувствительности 9-20 ТГц при $T = 4,2\text{K}$ и 15-30 ТГц при $T = 77\text{K}$. Длинноволновая чувствительность наиболее узкозонных образцов сохраняется до 200 мкм при $T = 4,2 \text{ K}$ и до 30 мкм при $T = 77 \text{ K}$. В их спектрах при температуре жидкого гелия наблюдаются провалы на частотах 120 см^{-1} и 150 см^{-1} , связанные с фундаментальным поглощением HgTe -подобными и CdTe -

подобными поперечными оптическими фонами В спектрах объемных образцов выделяются особенности в виде максимумов чувствительности в районе $140-180\text{ см}^{-1}$ и $260-300\text{ см}^{-1}$ (рис. 1. (а,б)). На спектрах структур имеется хорошо заметный провал в районе 300 см^{-1} , связанный с отражением от GaAs-подложки (рис. 1. (б)). Для более широкозонного образца 110330 «красная» граница фотопроводимости находится на частоте 300 см^{-1} и в спектре не наблюдается резких особенностей.

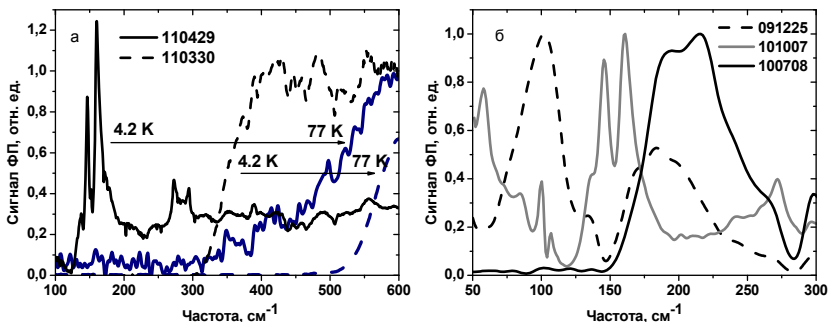


Рис. 1 Спектры ФП объемных образцов при температуре жидкого гелия и жидкого азота. (а) Длинноволновый край спектров ФП наиболее узкозонных из исследованных образцов ($T = 4,2\text{ K}$) (б)

№образца	y	x	d, нм	объем	КЯ
101007	0	0,165	5000	+	
110429	0	0,170	4000	+	
110330	0	0,192	6000	+	
091225	0,860	0,136	30		+
100708	0,646	0,154	30		+

С целью выявления природы максимумов сигнала в спектрах объемных образцов в районе $140-180\text{ см}^{-1}$ и $260-300\text{ см}^{-1}$ были проведены измерения спектров ФП в поперечном магнитном поле. Было обнаружено, что увеличение магнитного поля сдвигает «красную» границу ФП в область высоких частот, «отрезая» при этом все низкочастотные особенности. Это позволяет связать эти особенности с переходами в резонансные состояния акцепторов, которые при увеличении ширины запрещенной зоны вследствие квантования Ландау электронов переходят в запрещенную зону и не оказывают влияния на процессы фотопроводимости.

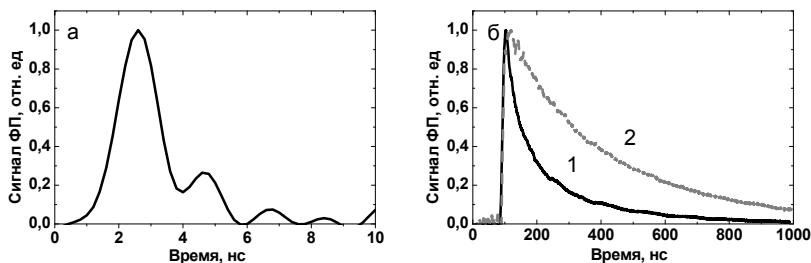


Рис.2 Осциллограммы фотоотклика, соответствующие наиболее быстрой (образец №101007 – а) и наиболее медленной (образец №110330 –б) релаксации носителей среди исследованных образцов.

Исследования кинетики релаксации ФП показали, что для наиболее узкозонных образцов (№101007, №110429, №091225) характерные времена спада неравновесной проводимости составляют от 2 до 10 нс (рис. 2.(а)). С ростом ширины запрещенной зоны и температуры времена жизни неравновесных носителей увеличиваются. Так, в образце №110330 релаксация сигнала происходила с постоянной времени ~ 200 нс при $T = 4,2$ К (рис. 2.(б1)) и 360 нс при $T = 77$ К (рис.2.(б2)). Оценка ампер-ваттной чувствительности этого образца при температуре жидкого азота на длине волны 19 мкм дает значение 5 А/Вт и соответственно NEP по дробовому шуму $6 \cdot 10^{-12}$ Вт·Гц^{-1/2}. Зависимость времени релаксации от ширины запрещенной зоны и температуры свидетельствует о том, что имеет место безызлучательная рекомбинация носителей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 12-02-00932), РАН и Минобрнауки (ГК 12.05.2011 № 16.518.11.7018).

Литература

1. A. Rogalski // Opto-Electronics Review, 16(4), pp 458–482, (2008)
2. S.Dvoretzky, N.Mikhailov, Yu.Sidorov et al. // J. Electron. Mater. 39, 918 (2010).

У72 Об инфракрасной микроскопии высокого разрешения для изучения переноса тепла в нанопокртыях и нанокмползитах

Дмитриев А.С., Романов А.С., Смирнов Ю.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

В настоящее время вопросы переноса тепла в наноструктурах имеют важное значение для широкого круга фундаментальных и прикладных проблем - охлаждение микросхем с наноразмерными компонентами охлаждения светодиодов высокой яркости и полупроводниковых микролазеров. Кроме того, подобные проблемы возникают при проектировании и создании генераторов и термоэлектрических микромодулей, в том числе для охлаждения оптоэлектроники. Существующие методы исследования теплообмена в наноструктурах (комбинационное рассеяние света, использование микроустройств с наноразмерными компонентами и т.д.) не позволяют быстро и эффективно измерить тепловых полей в наноструктурах, таких как нанопокртыя и нанокмползиты [1,2]. В связи с этим, в данной работе представлен новый метод исследования теплообмена в таких структурах - инфракрасные термометры высокого разрешения, которые позволяют решать важные задачи теплообмена.

Особый интерес представляют поверхностные и межфазные явления, определяющие адгезию и аутогезию полимерных, углеродных и неметаллических покртыий и слоев, а также процессы смачивания при неизотермических условиях. Они связаны с избытком свободной энергии в пограничных слоях: поверхностной и межфазной энергией, особенностями их структуры и состава, и обуславливают повышенную активность и ориентацию молекул в этих слоях.

Для исследования процессов передачи тепла в нанокмползитах и наноструктурированных покртыях была использована инфракрасная камера высокого разрешения фирмы «Артрэй» (ArtrayTHERMO-320). Она позволяет определять локальную температуру поверхности материала (минимальные размеры объекта для определения его температуры составляют 18 мкм) при длинах волн от 8 до 14 мкм при передаче через него теплового потока, что позволяет определить теплофизические характеристики новых теплоизоляционных покртыий, содержащих компоненты нанометрового диапазона.

Установка для измерения тепловых характеристик состоит из пленочного нагревателя, на одной стороне которого - теплоизоляция, а на противоположенной стороне - исследуемый образец. ИК-камера отображает распределение температурного поля на поверхности образца. В частности, этим методом были исследованы специальные теплоизоляционные покрытия фирмы «Нансулэйт» (Nansulate). Оказалось, что на слое толщиной всего 300 мкм, нанесенном на поверхность металлической пластины, возможен перепад температур в 25°C.

Кроме того, теплоперенос оказывает существенное влияние на процессы смачивания и растекания. В связи с этим, при исследовании процессов смачивания покрытий из углеродных нанотрубок, изучалось влияние температуры поверхности на контактный угол смачивания. В этих экспериментах, помимо использования современного гониометра фирмы «Крюс» (KrussEasyDrop), также была использована инфракрасная микроскопия для определения распределения температуры на поверхности покрытия. Оказалось, что на образцах, изготовленных из никелевых пластин с нанесенными на их поверхность неупорядоченными углеродными нанотрубками, контактный угол смачивания воды слабо зависит от температуры и составляет, примерно, 90°. Кроме того, при достижении температуры в 200°C, на поверхности образца, покрытого слоем углеродных нанотрубок, отсутствует эффект Лейденфроста, в то время как на чистой никелевой пластине капля воды может «парить» до нескольких минут.

Для определения влияния С-С связей в составе покрытия на контактный угол смачивания при неизотермических условиях, планируется провести подобные опыты на двумерных поверхностях, состоящих из плотноупакованных на подложке свинцовых микрошариков диаметром от 100 до 200 мкм, покрытых сажей. Предполагается, что наличие или отсутствие паровой фазы между шариками не должно сильно сказаться на смачивании поверхности различными жидкостями. Также предполагается, при помощи ИК-микроскопии, исследовать процессы испарения и конденсации на данных покрытиях.

Литература

4. А.С. Дмитриев. Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2012.

2. А.С. Дмитриев. Тепловые процессы в наноструктурах. М.: МЭИ. 2012.

У73 Мультиплексирование фотосигналов в фоточувствительных матрицах второго поколения

Хромов С.С., Кузнецов П.А.

ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

Расширение круга решаемых задач в матричных фотоприемных устройствах (ФПУ) потребовало поиска новых способов считывания (мультиплексирования) фотосигналов. Анализ технических требований, предъявляемых к матричным ФПУ потенциальными потребителями, позволяет выделить следующие новые направления в организации считывания:

- введение функции просмотра изображения в режиме «окна» (одного или нескольких), что позволяет выделять из полноформатного кадра только интересующие объекты;

- бинирование фотосигнала за счет его считывания не с каждого ФЧЭ, а с массивов ФЧЭ с заданными размерами: 2x1, 2x2, 4x4 и т.д.;

-реализация в накопительной ячейке функции высокочастотной фильтрации фотосигнала (низкочастотная фильтрация осуществляется самим процессом интегрирования фототока), что позволяет повысить отношение сигнал-шум, динамический диапазон, а также проводить селекцию динамических целей;

-введение в накопительную ячейку электронного микросканирования (ЭМС), позволяющего значительно повысить разрешение фоточувствительной матрицы.

В докладе предлагаются структурные схемы матричных мультиплексоров (МП) с реализацией вышеперечисленных функций. Например, на рис.1 приведена накопительная ячейка МП формата 320x256 с ЭМС в ячейке $30 \times 30 \text{ мкм}^2$, позволяющий проводить стыковку с ФЧЭ 640×512 и шагом $15 \times 15 \text{ мкм}^2$. ЭМС осуществляется за счет коммутации 4 в 1 в ячейке МП с помощью 4-х разрядного регистра, общего для всего МП.

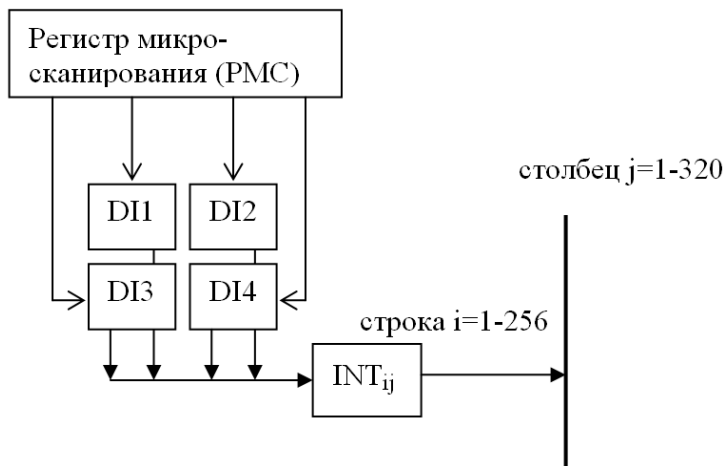


Рис.1 ЭМС в накопительной ячейке.

Возможны два основных режима работы РМС:

- бинирование: ячейки ФЧЭ объединяются в группу 2×2 размером $30 \times 30 \text{ мкм}^2$.

-последовательный сдвиг: каждая из четырех ячеек ФЧЭ $15 \times 15 \text{ мкм}^2$ по очереди замыкается через каскады прямой инжекции DI1...DI4 к входу интегратора INTij.

Целесообразно гибкое совмещение режимов РМС. Например, работа МП с высокой кадровой частотой с шагом $30 \times 30 \text{ мкм}^2$ и выбор «окна» с шагом $15 \times 15 \text{ мкм}^2$ (рис.2).

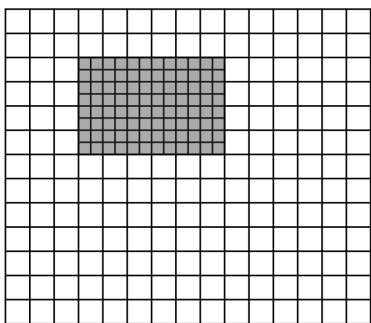


Рис.2 Режим «окна»

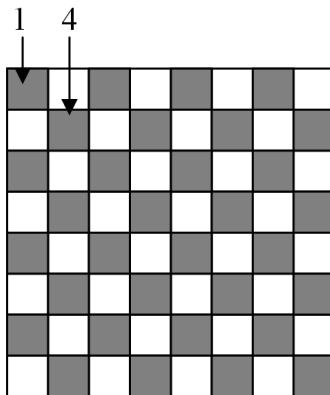


Рис.3 Мозаичное считывание

Возможен, также, режим РМС с загрузкой цифрового кода. Например, если код = 1001, то к входу НЯ подключаются только ФЧЭ 1 и 4 (рис.3).

Структурная схема МП с одновременным формированием нескольких «окон» приведена на рис.4. В предлагаемом варианте вводятся два регистра хранения параметров «окон»: RWX и RWY.

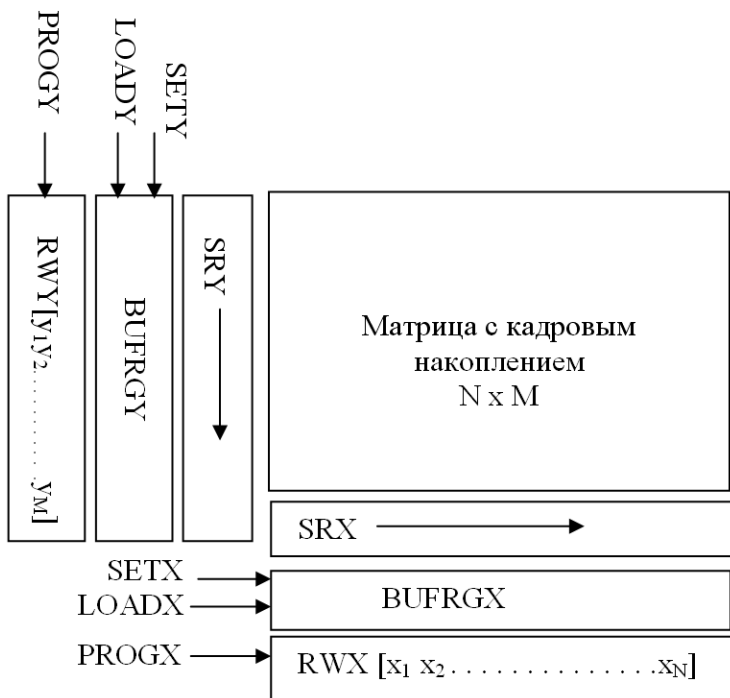


Рис.4 Структура мультиплексора с режимом «окна»

Ввод двоичных кодов $[x_1 x_2 \dots x_N]$, $[y_1 y_2 \dots y_M]$ осуществляется однократно (до следующей записи) через последовательные порты PROGX, PROGY. Работа регистров SRX, SRY происходит таким образом, что считываются области фоточувствительной матрицы («окна»), соответствующие указанным двоичным кодам. Для большей гибкости в задании режима «окна» введены буферные регистры BUFRGX, BUFRGY, позволяющие, после команды LOAD, хранить текущее значение «окна» (или «окон») и загружать новую конфигурацию в регистры RWX, RWY. При этом возможна быстрая (за один такт) смена конфигураций «окна», а также переход к полноформатному кадру при подаче команд SETX, SETY.

А01 Программное обеспечение для расчета нелинейности энергетической характеристики УФ фотодиода с барьером Шоттки

¹ Добровольский Ю.Г., ² Кузенко В.Ю., ¹ Шабашкевич Б.Г.

¹ Научно-производственная фирма «Тензор», Черновцы, Украина

² Буковинский государственный финансово-экономический университет, Черновцы, Украина

Исследование параметров окружающей среды, в том числе параметров ультрафиолетового (УФ) излучения, как наземного, так и космического происхождения, неизменно остается актуальной задачей. Для решения этой задачи используются УФ радиометры с фотодиодами различных конструкций, в том числе на основе эпитаксиальных структур с барьером Шоттки (ФДШ).

Существенным требованием к таким датчикам, является нелинейность энергетической характеристики в широком диапазоне потоков УФ излучения. Данный параметр характеризует динамический диапазон фотодиода, от которого зависит диапазон измеряемых энергетических освещенностей УФ радиометра. Обычно, исследование этого параметра производится на готовых ФДШ. Однако это достаточно затратный процесс, как по временным, так и по экономическим показателям.

Задачей данного исследования являлось разработка способа оценки нелинейности энергетической характеристики УФ ФДШ на основе эпитаксиальной структуры с помощью компьютерного анализа. Для решения этой задачи разработан соответствующий алгоритм и программное обеспечение.

При разработке программного обеспечения учитывались следующие факторы, влияющие на величину нелинейности энергетической характеристики фотодиода:

- концентрация неосновных носителей заряда в эпитаксиальном слое;
- концентрация примесей в эпитаксиальном слое;
- толщина контактного слоя металла;
- величина собственных шумов фотодиода;
- ширина области пространственного заряда в эпитаксиальном слое;
- ширина области пространственного заряда на границе раздела низкоомная подложка – эпитаксиальный слой;
- диффузионная длина неосновных носителей заряда;
- глубина поглощения длин волн принимаемого излучения;
- коэффициент температурной нестабильности фотодиода;
- коэффициент временной нестабильности фотодиода.

Для расчета брались также граничные условия работы фотодиода, которые накладываются условиями эксплуатации:

- диапазон измеряемой энергетической освещенности;
- температурный диапазон работы фотодиода;
- режим работы – фотодиодный или фотогальванический (для первого диапазон рабочих напряжений).

Некоторые аналитические выражения для оценки чувствительности УФ ФДШ приведены ниже.

Для оценки токовой интегральной чувствительности S_{int} в некотором спектральном диапазоне используется формула для оценки токовой

монохроматической чувствительности (1), проинтегрированная по необходимому спектральному диапазону $\lambda_1 - \lambda_2$:

$$S_{\text{int}} = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} (1 - R_{1\lambda}) \frac{e_0 \gamma_{\lambda} \lambda}{hc} (1 - e^{-\alpha_{\lambda} x_0}) d\lambda \quad (1)$$

где: $R_{1\lambda}$ - коэффициент отражения от поверхности воздух - барьерный слой - полупроводник для заданной длины волны;

λ - заданная длина волны;

α_{λ} - коэффициент поглощения излучения с заданной длиной волны в полупроводнике;

$\gamma(\lambda)$ - коэффициент использования фототока (внутренний квантовый выход);

h - постоянная Планка;

c - скорость света в вакууме;

e - элементарный электрический заряд (заряд электрона);

x_0 - ширина электрического поля, созданного барьером между полупроводником и слоем проводника.

С другой стороны, для обеспечения максимальной интегральной чувствительности фотодиода используется система неравенств (2), которая позволяет оптимизировать конструкцию фотодиода, работающего в фотогальваническом режиме:

$$\begin{cases} x_0 < h_{\text{эс}} \leq (L_p + d + h) \\ L_p < (h_{\text{эс}} - d) \\ \alpha_{\text{к}} < d \leq L_p \end{cases} \quad (2)$$

где: $h_{\text{эс}}$ - ширина эпитаксиального слоя;

L_p - диффузионная длина дырок;

d - ширина области объемного заряда в эпитаксиальном слое;

$\alpha_{\text{к}}$ - глубина поглощения излучения в эпитаксиальном слое.

Переменные	Граничные условия
Концентрация носителей заряда в эпитаксиальном слое $N_{\text{эф}}$	Диапазон линейной энергетической освещенности ΔE
Концентрация примесей в эпитаксиальном слое $N_{\text{пр}}$	Температурное значение работы выхода в ТУ на исследуемом излучении
Плотность контактного слоя $N_{\text{к}}$	фотодиодный фотогальванический
Ширина собственного заряда фотодиода M_p	диапазон рабочих напряжений
Ширина области пространственного заряда в эпитаксиальном слое $L_{\text{эс}}$	
Ширина области пространственного заряда на границе раздела неосновных примесей - эпитаксиальный слой $L_{\text{пр}}$	Дополнительные условия
Диффузионная длина неосновных носителей заряда $L_{\text{дн}}$	
Глубина поглощения для волны проанализируемого излучения $L_{\text{п}}$	
Коэффициент температурной нестабильности $K_{\text{т}}$	
Коэффициент временной нестабильности $K_{\text{в}}$	
Коэффициент температурной нестабильности $K_{\text{т}}$	Результат ΔE

На рисунке приведен общий интерфейс программы для оценки нелинейности энергетической характеристики УФ ФДШ на основе эпитаксиальной структуры, разработанной в программной среде QT 4.7, адаптированной для всех операционных систем семейства Windows и операционных систем на базе Linux: Ubuntu, Kubuntu, Debian, которые поддерживают графический интерфейс пользователя.

Во всплывающих меню по каждому пункту ввода переменных параметров и граничных условий, пользователь получает информацию о возможном месте нахождения искомого данных в среде Internet и окно для их ввода в формате *html, который поддерживается разработанным программным обеспечением.

A02 Матричное фотоприёмное устройство формата 320×256 для спектрального диапазона 0,9 - 1,7 мкм на основе эпитаксиальной фотодиодной гетероструктуры InGaAs/InP

¹ Андреев Д.С., ^{1,2} Болгарь К.О., ^{1,3} Бурлаков И.Д., ¹ Залетаев Н.Б., ¹ Кравченко Н.В.,
¹ Лопухин А.А., ¹ Трошков А.Е., ¹ Филачёв А.М., ¹ Чинарёва И.В.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (ГУ), Долгопрудный, Россия

³ МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

Разработано и исследовано макетное неохлаждаемое матричное фотоприёмное устройство (МФПУ) формата 320x256 с шагом 30 мкм для ближнего ИК-диапазона. Представлены результаты разработки и исследований. МФПУ создано на основе матрицы фотодиодов на эпитаксиальной гетероструктуре InGaAs/InP, состыкованной методом flip-chip с кремниевым КМОП-мультиплексором. Приводятся основные параметры МФПУ и кадры изображений объектов в ближнем ИК-диапазоне. Средняя пороговая чувствительность каналов МФПУ при времени накопления 40 мс составляет $7 \cdot 10^9$ фотонов/см²·с. Средняя обнаружительная способность - $1,6 \cdot 10^{12}$ см·Гц^{1/2}/Вт.

Данная разработка является продолжением работы по разработке базовой технологии производства МФПУ на основе фотоприёмников из InGaAs, предназначенных для нового поколения приборов ночного видения, проводившейся в НПО «Орион» в 2007-2010 гг. По той технологии был изготовлен опытный образец МФПУ формата 128x128 [1-5].

В процессе разработки МФПУ формата 320x256 технология была усовершенствована. Матрица фоточувствительных элементов изготавливалась по планарно-диффузионной технологии [6]. P-n переходы формировались диффузией кадмия. В качестве пассивирующего, маскирующего и просветляющего покрытия использовались слои Si₃N₄. В качестве металлизации использовались слои титан-золото, напыленные в вакууме. Выделение контактных площадок проводилось фотолитографическим путём методом "взрыва". Формирование диафрагмы с обратной стороны кристалла производилось с помощью фотолитографии и прямого травления двухслойной системы Ti/Au. Внешний вид МФПУ представлен на рис. 1.

Исследованы фотоэлектрические характеристики МФПУ. Обработка фотосигнала в реальном времени проводилась на компьютере, содержащем АЦП-плату, по специально разработанной программе. МФПУ подключалось к АЦП через блок сопряжения с программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС).

Основные параметры разработанного МФПУ:

– шаг (размер) фоточувствительных элементов	30x30(25x25) мкм ² ;
– спектральный диапазон	0,9 - 1,7 мкм;
– диапазон температур окружающей среды	-50°С - +50°С;
– время накопления	до 40 мс;
– средняя вольтовая чувствительность в $\lambda_{\text{макс}}$	$4,2 \cdot 10^{10}$ В/Вт;
– макс. выходной сигнал	2 В;
– средняя пороговая чувствительность в $\lambda_{\text{макс}}$	$7 \cdot 10^9$ фотонов/см ² ·с;
– средняя обнаружительная способность в $\lambda_{\text{макс}}$	$1,6 \cdot 10^{12}$ см·Гц ^{1/2} /Вт;
– термостабилизация	двухкаскадный термоэлектрический охладитель.

Кадр изображения, полученного с помощью разработанного МФПУ, приведен на рис. 2.



Рис.1. МФПУ 320x256 на InGaAs/InP.



Рис.2. Кадр изображения в ближнем ИК-диапазоне

Литература

1. Патент на изобретение № 2318272 Способ изготовления быстродействующего многоэлементного фотоприёмника на основе эпитаксиальных структур InGaAs/InP. Зарегистрировано в Гос. реестре изобретений РФ 27 февраля 2008 г. Авторы: О.В. Огнева, И.В. Чинарёва, О.Н. Забенькин, Т.Н. Мищенко.
2. Свидетельство о госрегистрации топологии интегральной схемы № 2008630023 Кристалл матрицы pin-фотодиодов формата 128x128 на основе гетероструктур InGaAs/InP. Зарегистрировано 19 марта 2008 г. Авторы: О.В. Огнева, И.В. Чинарёва.
3. Н.Б. Залетаев, И.В. Чинарёва, П.А. Кузнецов, Н.В. Кравченко, Е.А. Климанов, А.Е. Трошков, А.А. Зайцев, А.В. Кузнецов, "Матричное фотоприёмное устройство на основе InGaAs/InP для ближнего ИК диапазона", Тезисы докладов 21-й Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 25-28 мая 2010 г., Москва, НПО «Орион» с. 112.
4. Н.Б. Залетаев, И.В. Чинарёва, Н.В. Кравченко, Е.А. Климанов, А.Е. Трошков, А.А. Зайцев, К.О. Болтарь, "Разработка технологии производства матричных фотоприёмных устройств на основе полупроводниковых диодных гетероструктур из материала InGaAs/InP", в сборнике ГНЦ РФ ФГУП "НПО "Орион", Научные результаты объединения за 2010 год, с.74-82.
5. Д.С. Андреев, Т.Н. Гришина, Н.Б. Залетаев, М.А. Трищенко, И.В. Чинарёва, "Многоэлементные быстродействующие фотодиоды на основе гетероструктур InGaAs/InP", Прикладная физика, 2012, в печати.
6. Заявка на госрегистрацию топологии интегральной схемы Кристалл матрицы pin-фотодиодов формата 322x258 на основе гетероструктур InGaAs/InP, 2011 г. Авторы: Д.С. Андреев, И.В. Чинарёва.

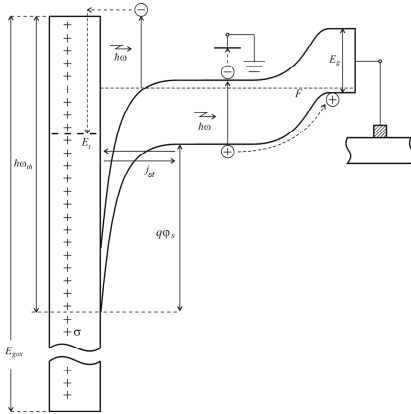
А03 Механизм формирования латентного изображения в ИК матрицах на основе InSb

¹ Селяков А.Ю., ^{1,2} Болтарь К.О., ^{1,3} Бурлаков И.Д., ¹ Лопухин А.А.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (ГУ), Долгопрудный, Россия

³ МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия



Эффект формирования латентного изображения в низкофоновых ИК матрицах на основе InSb, предназначенных для астрономических наблюдений рассмотрен в работах [1,2]. В настоящем докладе рассмотрен механизм формирования латентного изображения в ИК матрицах на основе InSb наблюдаемый в условиях сильных засветок.

После окончания засветки какой-либо группы пикселей матриц на основе InSb сильным ИК излучением с каждого из засвеченных пикселей на протяжении длительного времени (вплоть до десятков минут) регистрируется остаточный сигнал

(в несколько раз превышающий шум) формирующий т.н. латентное изображение. Результаты экспериментов позволяют сделать вывод, что формирование латентного изображения обусловлено увеличением квантовой эффективности группы пикселей, подвергшихся воздействию сильного ИК излучения. Такой эффект может быть обусловлен снижением скорости поверхностной рекомбинации на обратной стороне фоточувствительной структуры при изменении величины встроенного заряда в пассивирующем диэлектрике, который в структуре InSb - анодный окисел является положительным [3 - 5]. Главный экспериментальный факт, нуждающийся в объяснении, состоит в том, что латентное изображение обусловлено излучением среднего ИК диапазона, в то время как экспериментальные исследования МДП структур InSb - анодный окисел показывают, что накопление отрицательного заряда на «медленных» уровнях в анодном окиселе обусловлено излучением с энергией кванта $\hbar\omega \geq \hbar\omega_{th} = 1,3$ эВ [3]. Положительный контраст латентного изображения также нуждается в объяснении, т.к. уменьшение поверхностного изгиба зон, вследствие захвата электронов на «медленные» уровни приведет к увеличению скорости поверхностной рекомбинации, уменьшению квантовой эффективности пикселя и отрицательному контрасту латентного изображения.

Заброс электронов из полупроводника в зону проводимости анодного окисла под действием ИК излучения с энергией кванта $\hbar\omega \ll \hbar\omega_{th}$ может иметь место при поглощении ИК излучения на свободных носителях в приповерхностной области, в случае, если положительный заряд в окисле s настолько велик, что поверхностный изгиб зон $q\phi_s$ удовлетворяет условию $\hbar\omega_{th} - E_g - q\phi_s < \hbar\omega$ (см. рис).

При столь большом встроенном заряде в анодном окисле будет так же выполняться условие $q\phi_s > E_g$, которое означает, что поверхностная рекомбинация в рассматриваемой структуре обусловлена прямыми межзонными туннельными переходами в приповерхностной области. Теория локальной поверхностной генерации

носителей в *p-n* переходах на основе узкозонных полупроводников развита в работе [5]. Механизмы взрывного шума *p-n* переходов на основе InSb обусловленные перезарядкой примесных центров в анодном окисле проанализированы в работе [4]. При захвате электронов на «медленные» уровни эффективный встроенный положительный заряд в окисле будет уменьшаться, соответственно будет уменьшаться поверхностный потенциал. Уменьшение перекрытия зон приведет к уменьшению скорости поверхностной туннельной рекомбинации и соответственно к увеличению квантовой эффективности пиксела, что, в свою очередь объясняет положительный знак контраста латентного изображения.

Литература

- [1] S. L. Solomon; J. D. Garnett; H. Chen // Proc SPIE, 1993, v. 1946, pp.33-45.
- [2] R.G. Benson, et al // Proc. SPIE, 2000, v. 4131, p. 171 - 184.
- [3] W. E. Krag, R. J. Phelan, J. O. Dimmock // Journal of Applied Physics, 1969, v 40, № 9, pp 3661 - 3667.
- [4] В.П. Астахов, В.Ф. Дудкин, Б.С. Кернер, В.В. Осипов, О.В. Смолин, И.И. Таубкин // Микроэлектроника, 1989, т. 18, вып. 5, с. 455 - 463.
- [5] Б.С. Кернер, А.Ю. Селяков, А.Н. Суханов // ФТП, 1990, т. 24, № 8, с. 1455-1461.

A04 Программное обеспечение для управления и обработки данными спектрофотометрии

¹ Кузенко В.Ю., ² Кузенко В.И., ² Воробець Г.И., ² Воробець О.И,
¹Добровольський Ю.Г., ¹Прохоров Г.В.

¹ Буковинский государственный финансово-экономический университет, Черновцы,
Украина

² Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича, Украина

Широкое использование в современном производстве и быту разнообразных источников и сенсоров оптического излучения требует разработки новых и совершенствования существующих методов контроля их параметров, в частности, исследований их спектральных характеристик. Для таких исследований в большинстве случаев используют автоматизированные монохроматоры, которые работают по определенным алгоритмам и реализованы в виде специализированного программного обеспечения (ПО).

Общим недостатком существующих аналогов является отсутствие модуля математической обработки результатов измерений для исследования "тонкой структуры" спектров, и анализа результатов по соответствующим базам данных, созданных на основе Фурье-моделирования или литературных источников, как это реализовано, например, в современных рентгеновских микроанализаторах и других измерительных системах. Кроме того, рассмотренное ПО является сравнительно дорогим, поскольку ориентировано на обслуживание определенного узко специализированного типа оборудования и на работу в компьютеризованных системах под управлением лицензионных ОС типа Windows.

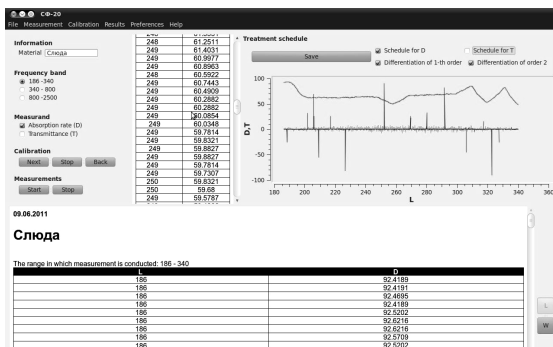
Поэтому актуальной является задача разработки универсального ПО на кросс - платформенной основе для работы как в ОС Windows, так и в модификациях ОС типа Linux, которое бы обеспечивало дополнительные возможности математической обработки и анализа результатов измерений, подготовки отчетов в виде графических файлов (*.jpg, *.png), документов в формате *.html и их сетевой передачи.

В качестве базового пакета для создания универсального ПО в среде QT 4.7 разработана программа для управления и обработки данных автоматизированного спектрофотометра СФ-20. Программа адаптирована для всех ОС семейства Windows, и ОС на базе Linux: Ubuntu, Kubuntu, Debian, что поддерживают графический интерфейс пользователя. Минимальные аппаратные требования: Pentium 100, 32 Mb RAM, 10 Mb HDD, 64 Mb VGA. Для работы с графическими объектами необходимо графический адаптер с объемом памяти 128 Mb.

Управление спектрофотометром осуществляется отдельным модулем ПО через плату устройства сопряжения, подсоединений к LPT порту компьютера. Корректность функционирования этого модуля обеспечивается в режиме его запуска с правами администратора системы (для ОС на базе Linux). В соответствии с выбранным алгоритмом программа позволяет провести калибровку прибора в ручном, или автоматическом режиме перед проведением измерений в выбранном диапазоне $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$. Полученные результаты измерения спектральных характеристик записывается в соответствующие базы данных в виде таблиц с указаниями начальных условий и реквизитов образца, и отображением их в табличном и графическом виде с возможностью импорта в графический файл или *.html документ.

Основными выходными данными программы "СФ-20" является таблица, в которую заносятся результаты измерений. В качестве примера на рисунке приведены зависимости коэффициентов поглощения (D) и пропускания (T) слюды, которые измеряются согласно стандартным методикам. Рядом отображается соответствующий график зависимости искомых коэффициентов от длины волн. Программа позволяет проводить дифференцирование 1-го и 2-го порядка и отобразить результаты на графике.

К выходным данным программы принадлежит отчет, где указывается дата проведения измерений, название исследуемого образцу, избранный диапазон длин волн, таблица и график. Также при наличии подключения к сети Internet программа демонстрирует статью из ресурса Wikipedia, которая описывает исследуемый образец.



В результате решения указанной задачи выполнен ряд работ, в частности:

- предложен алгоритм и реализована модульная структура организации ПО для автоматизации измерений и обработки спектральных характеристик материалов и веществ;
- средствами среды программирования QT 4.7 разработано универсальное ПО с блоком обработки результатов измерений, для управления измерительным процессом и его условиями с ПК, адаптированное для ОС семейства Windows и ОС на базе Linux: Ubuntu, Kubuntu, Debian, поддерживающие графический интерфейс;

- программный продукт реализован на примере системы управления и снятия показаний с спектрофотометра СФ-20 с дальнейшим их отображением в графическом и табличном виде, автоматической генерации отчетов о проведенном измерении и получении дополнительной информации по исследуемому образцу, средствами глобальной сети.

Полученные результаты сохраняются в ПК и обрабатываются средствами созданного ПО. Полученная графика и таблицы вместе с заданными начальными условиями и названием исследуемого образца транспортируются в виде отчета формата html.

A05 Модифицированный аналого-цифровой разностный процессор кадра для тепловизионной камеры

Кондратов П.А., Ткаченко В.Ф.

Национальный университет «Львовская политехника», Львов, Украина

В телевизионных камерах (ТК) на основе пировидиконов, как правило, применяется предварительная обработка видеосигнала. Это связано с особенностями их функционирования. В результате простейшей разностной обработки двух смежных кадров происходит суммирование полезного пиросигнала и уменьшение компоненты пьедестала. Нами рассмотрен метод предварительной обработки, позволяющий значительно расширить функциональные возможности и повысить качество двухкадровой обработки сигнала (ДОС). Классическая схема ДОС предполагает преобразование пиросигнала в цифровую форму с необходимой точностью, запоминание его в памяти кадра и синхронное попиксельное вычитание в АЛУ из текущего сигнала последующего кадра. К недостаткам такой схемы обработки следует отметить необходимость использования высокоскоростных и точных АЦП, влияние шумов квантования, потерю информации об уровне пьедестала. Улучшенная схема обработки может быть получена с помощью последовательной двухуровневой ДОС - грубой и точной. На втором уровне обработки второй малоразрядный ЦАП оцифровывает, грубо выделенный сигнал, с оптимальным динамическим диапазоном. ДОС второго уровня полностью устраняет из этого сигнала ложную компоненту, поскольку пьедестал остается неизменным при двух последовательных кадрах развертки. Недостаток данного метода обработки заключается в отсутствии коррекции пространственной неоднородности чувствительности мишени. Для обеспечения такой коррекции необходима информация о текущем пьедестале. Нами разработан видеопроцессор, который использует двухуровневую двухкадровую обработку сигнала (ДОС) и позволяет корректировать пространственную неоднородность чувствительности для получения нормализованного полезного сигнала (S). Особенностями такого узла является использование только одного малоразрядного АЦП и рекурсивной фильтрации для выделения компоненты пьедестала. Дальнейшей модификацией этой структуры является введение в нее памяти пьедестала (P) с целью использования информации об его уровне и неоднородности для пространственной коррекции неоднородности чувствительности путем двухуровневого разностного кодирования [1]. При этом дифференциальный усилитель ДП (Рис.1) осуществляет разностную обработку 1-го уровня: из сигнала $(P \pm S)$, поступающего на его вход в течение времени считывания кадра T_k , отнимает некоторое приближенное значение пьедестала. Полученная разница усиливается в $K \approx P_{\max}/S_{\max}$ раз (с помощью дополнительных логических схем K можно изменять в зависимости от значения средних уровней P и S в течение T_k), оцифровывается и запоминается в ПК.

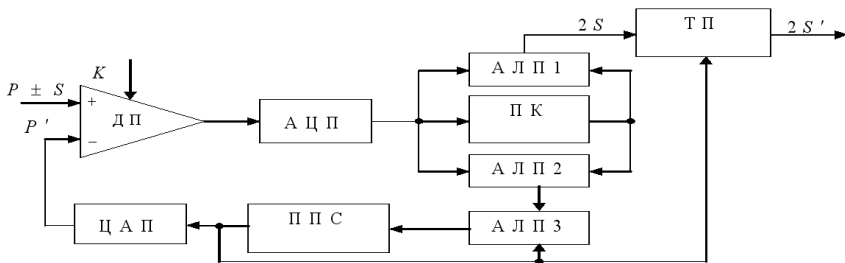


Рис. 1. - Структура видеопроцессора ДОС суммарно-разностной обработки с коррекцией пространственной неоднородности пьедестала: ДП - дифференциальный усилитель, АЛУ - аналого-цифровое устройство, ПК - память кадра, ППС - память пьедестала, ТП - таблица пересмотра.

После смены положения обтюлятора АЛУ 1 вычитает из него разностный сигнал следующего кадра, в котором пьедестал имеет противоположную полярность.

$$|(P \pm S - P') - (P \mp S - P')| = 2S$$

Тем самым осуществляется разностная обработка 2-го уровня, которая устраняет остаточную ошибку вычитания и делает исходный сигнал униполярным. При этом, АЛУ 2 вычисляет текущую погрешность значения:

$$\frac{(P \pm S - P') + (P \mp S - P')}{2K} = P - P'$$

Расчетная поправка добавляется в АЛУ 3 к предыдущему уровню пьедестала, считанного с ППС, и снова заносится туда. Информация с её выхода используется для коррекции выходного сигнала в соответствии с распределением уровня пьедестала по кадру, который осуществляется в зависимости от содержания ТП, и для формирования в ЦАП текущего значения пьедестала:

$$P' = M \cdot U_k^j$$

где U_k - информация из памяти пьедестала в аналоговой форме; j - порядковый номер корректирующего цикла; M - коэффициент разницы между опорными напряжениями ЦАП и АЦП. Поскольку от кадра к кадру пьедестал меняется медленно и незначительно, выходной сигнал можно использовать в каждом из кадров [2]. Для рассматриваемой структуры переходная характеристика рекурсивного фильтра имеет следующие вид и решения:

$$U_k^{j+1} = U_k^j + P - M \cdot U_k^j,$$

$$U_k^{j+1} = (1 - M)^j \cdot (U_0 - P/M) + P/M,$$

где U_0 - начальное состояние ППС.

Фильтр стабилен при $0 < M < 2$. Минимальное время переходных процессов обеспечивается при $M \approx 1$ (Рис. 2).

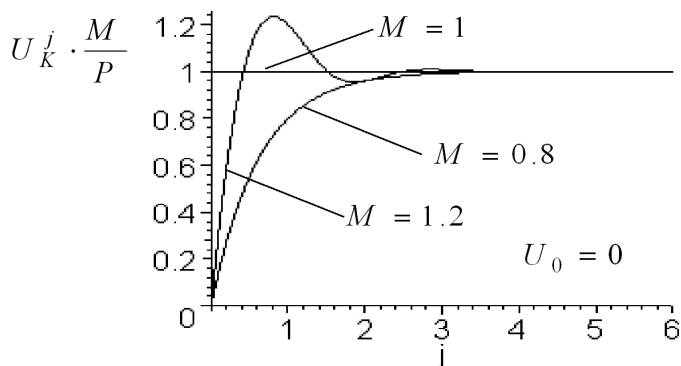


Рис. 2. Переходная характеристика рекурсивного фильтра суммарно - разностной обработки пиросигнала

Предлагаемая структура суммарно-разностной обработки пиросигнала позволяет увеличить эквивалентную разрядность выходного сигнала, как минимум, на 3-4 разряда и значительно уменьшить уровень геометрических шумов при вполне приемлемых аппаратных затратах (в частности, применением только одного малоразрядного АЦП). Использование предлагаемого устройства существенно улучшит процедуры поиска, идентификации и отслеживания объектов мониторинга.

Литература

1. I. Bozhenko, V. Bozhenko, O. Kondratov, P. Kondratov. Research of Image Difference Processing Ways in Thermovision Camera Based on Pyrovidicon // Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application. - Lviv: NU "LP", 2007. - p.181-183.
2. Патент Украины № 47162 от 25.01.2010г., П.Кондратов «тепловизионная камера». Бюл. № 2Ю, 2010г.

А06 Многослойные оптические покрытия и интерференционные фильтры для среднего ИК-диапазона спектра

Иванов В.А., Тропин А.Н., Шалин В.Б.

ОАО «НИИ «Гириконд», Санкт-Петербург, Россия

Современные достижения в области техники инфракрасного диапазона диктуют новые требования к характеристикам оптических элементов. В полной мере это относится и к фильтрующим элементам, преобразующим спектральный и фазовый состав излучения. В отличие от видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра, где возможно использование сорбционных фильтров, например, из цветного стекла, задача фильтрации излучения среднего и дальнего ИК-диапазонов решается в подавляющем большинстве случаев с использованием интерференционных фильтров [1, 2].

Так, на предприятии ОАО «НИИ «Гириконд» (г. Санкт-Петербург) на протяжении длительного времени разрабатываются и создаются оптические покрытия и интерференционные фильтры для диапазона спектра 1,5-25,0 мкм. Применительно к приборам ночного видения в частности, и к тепловизионным приборам в целом, наибольший практический интерес представляют интерференционные покрытия и

инфракрасные оптические фильтры на их основе, работающие в спектральных диапазонах 3-5 мкм и 8-12 мкм.

Оптические элементы для работы в среднем ИК-диапазоне спектра в основном изготавливаются из кремния и германия с последующим нанесением оптических покрытий различного назначения. Одним из наиболее распространенных типов покрытий являются просветляющие покрытия. На предприятии изготавливаются просветляющие покрытия на деталях из кремния с пропусканием более 95 % в диапазоне 3-5 мкм и на деталях из германия с пропусканием более 90 % в диапазоне 7-13 мкм (рис. 1).

Влияние фонового излучения различных источников помех в оптических приборах может быть снижено за счет использования соответствующих полосовых фильтров. Такие фильтры изготавливаются на подложках из кремния или лейкосапфира для диапазона 3-5 мкм и на подложках из германия для диапазона 8-12 мкм. В полосе пропускания фильтры имеют среднее значение пропускания не менее 85 % (рис. 2 и 3).

Кроме указанных типов фильтров на предприятии ОАО «НИИ «Гириконд» также выпускаются отрезающие и узкополосные фильтры для работы в средней инфракрасной области спектра (рис. 4).

Представленные на рисунках спектральные характеристики являются экспериментальными. Спектры пропускания измерены при комнатной температуре на инфракрасном Фурье-спектрометре ФСМ 1201.

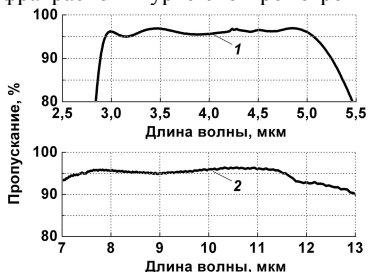


Рис. 1. Пропускание деталей из кремния (1) и германия (2) с двухсторонним просветлением

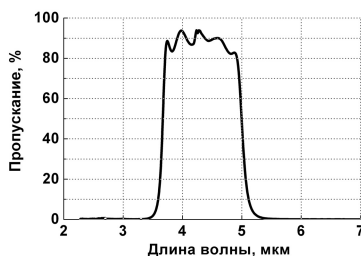


Рис. 2. Пропускание полосового фильтра на подложке из лейкосапфира

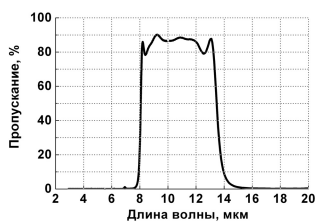


Рис. 3. Пропускание полосового фильтра на подложке из германия

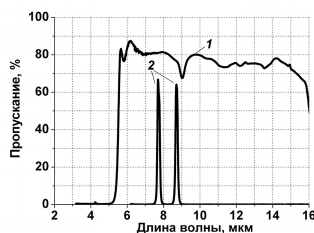


Рис. 4. Пропускание отрезающего (1) и узкополосных (2) фильтров

Отметим, что в технологии оптических покрытий можно выделить три ключевых момента: методы проектирования интерференционных покрытий, способы получения покрытий и стратегии контроля процесса вакуумного осаждения пленок [3]. Непрерывный анализ и внедрение в технологический процесс современных мировых достижений в области каждого из этих направлений позволяет создавать высококачественные, конкурентоспособные многослойные оптические покрытия и интерференционные фильтры на их основе, удовлетворяющие предъявляемым сегодня

требованиям к их спектральным характеристикам, себестоимости и надежности.

Литература

1. Интерференционные покрытия для оптического приборостроения / И.С. Гайнутдинов, Е.А. Несмелов, И.Б. Хайбуллин. – Казань: ФЭН, 2002. – 592 с.
2. Practical Design and Production of Optical Thin Films / R. R. Willey. – New York: CRC Press, 2002.
3. Thelen A. // Proc. SPIE. Advances in Optical Thin Films II. 2005. Vol. 5963. P. 1.

А07 Применение пленок индия в микроэлектронике

¹ Акимов В.М., ^{1,2} Болтарь К.О., ¹ Васильева Л.А., ¹ Демидов С.С., ^{1,3} Климанов Е.А.,
¹ Лисейкин В.П., ¹ Седнев М.И.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (ГУ), Долгопрудный, Россия

³ МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

Благодаря своим уникальным характеристикам индий находит широкое применение в микроэлектронике. В докладе рассмотрены различные области применения индия на различных этапах технологического процесса изготовления МОП мультиплексоров, предназначенных для считывания информации с фотоприемных матриц ИК диапазона.

Основное применение металл находит для изготовления индиевых микроконтактов, используемых для стыковки кристаллов МОП мультиплексора и матрицы фоточувствительных диодов. Массив индиевых микроконтактов формируется на лицевых сторонах каждого кристалла, а их гибридизация производится методом «перевернутого» кристалла. Полученное соединение обладает хорошими электрическими, механическими и тепловыми свойствами, недостижимое при использовании других материалов. Это связано с тем, что индий очень мягок и пластичен в широком диапазоне температур, он в 20 раз мягче чистого золота, а его сопротивление растяжению в 6 раз меньше, чем у свинца. Изменяя режим нанесения индия можно получать пленки разной структуры. В докладе рассмотрены различные способы получения индиевых микроконтактов и методы контроля параметров их параметров.

На последних этапах изготовления ИС при контроле работоспособности кристалла обнаруживаются дефекты в виде обрывов шин металлизации. При этом кристаллы малой и средней степени интеграции забраковываются, а дефекты в кристаллах СБИС анализируются для того, чтобы определить возможность коррекции рисунка металлизации. Способов коррекции не так уж много. Это напыление, если это возможно, дополнительного слоя металлизации с последующей фотолитографией или использование специализированных установок для локальной коррекции дефектов на кристалле. Такие установки, по сути, представляющие собой технологический микрокомплекс, позволяют проводить различные процессы в ограниченных областях кристалла, включая сухое травление различных технологических слоев, нанесение проводящих пленок и защитных диэлектрических покрытий и др. Однако стоимость таких установок высока и для ее обслуживания необходимо использование высококвалифицированных специалистов, что ограничивает их широкое применение в микроэлектронике.

Если вышеперечисленные способы коррекции по каким-либо причинам недоступны, то можно использовать для исправления обрывов проводящих шин

индиевые шунты. При этом края оборванных шин очищаются, и с помощью зондовых методов на них производится нанесение слоя индия с последующей деформацией его для получения «холодной» сварки индиевого шунта с основным материалом проводящих шин. В связи с тем, индий обладает хорошими адгезионными свойствами, он способен легко диффундировать в другие металлы, создавая при этом низкоомные контакты.

Одно из последних известных применений индия нашел в качестве проводящего слоя при тестировании кристаллов БИС считывания для создания области электрической закоротки элементов ячеек с подложкой при обнаружении «скрытых» дефектов в МОП мультиплексорах [1].

1. Патент на изобретение №2388110. Заявка №2009105899 от 19.02.2009. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27.04.10. Акимов В.М., Васильева Л.А., Климанов Е.А., Лисейкин В.П.

A08 Выявление скрытых дефектов в БИС считывания МФПУ

¹ Акимов В.М., ^{1,2} Болтарь К.О., ¹ Васильева Л.А., ^{1,3} Климанов Е.А., ¹ Лисейкин В.П.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (ГУ), Долгопрудный, Россия

³ МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

На протяжении многих лет проявляется повышенный интерес к созданию матричных фотоприемных устройств (МФПУ), предназначенных для считывания тепловизионной информации. В многоэлементных приемниках, собранных по гибридной схеме, преобразование оптического сигнала в электрический и последующая его обработка происходят раздельно в двух составных частях – матрице фоточувствительных элементов (МФЧЭ) и БИС считывания. Соединение двух кристаллов производится методом перевернутого монтажа с помощью индиевых микроконтактов, формируемых на лицевой стороне каждого кристалла.

Для получения БИС считывания, пригодного для гибридизации с МФЧЭ, проводится полный комплекс измерений на каждом этапе изготовления кристаллов, начиная с технологического контроля параметров до контроля работоспособности МФПУ в штатном режиме использования.

Контроль дефектности кристаллов БИС считывания производится после формирования рисунка металлизации. Однако после стыковки кристаллов обнаруживаются электрические дефекты БИС считывания, не фиксируемые при электрическом контроле до стыковки. Например, электрическое короткое замыкание исток – сток входного МОП транзистора в ячейке считывания фотосигнала.

Такой дефект при криогенных температурах дает двойную величину выходного сигнала с этого стока, что приводит в конечном итоге к забраковке изделия. При этом происходит невосполнимая потеря дорогостоящих кристаллов МФЧЭ и кремниевой БИС считывания.

Для обнаружения упомянутого выше дефекта обычно используется введение в каждую ячейку матрицы БИС дополнительных тестовых МОП транзисторов между истоками и подложкой. Однако этот метод регистрации дефектов обладает существенными недостатками. Во-первых, значительно уменьшается полезная площадь ячейки (до 50%) и, во-вторых, сами тестовые транзисторы и управляющие шины к ним необходимы лишь на этапе отбраковки кристаллов БИС, в дальнейшем они являются

балластом для кристалла, причем сама цепь тестирования может содержать дефектные элементы, что недопустимо снижает процент выхода годных структур.

В докладе описан метод выявления «скрытых» дефектов путем закорачивания всех истоков мультиплексора на подложку промежуточным слоем металла, например индия, из которого впоследствии будет сформирован массив индиевых микроконтактов для стыковки с кристаллом мультиплексора [1]. Фактически метод состоит из двух составляющих – технологической и измерительной. На измеряемом кристалле необходимо выполнить определенные технологические операции для последующей регистрации дефектов и определения их координат.

Разработанный метод измерения параметров упрощает обнаружение скрытых дефектов, он органично вписывается в технологический процесс изготовления БИС считывания. В зависимости от причины дефекта проводится либо устранение закоротки известными способами, либо снятие индиевого микроконтакта с истока МОП транзисторного ключа. В этом случае линейный дефект шины стока (двойной величины выходной сигнал) устраняется, либо исправляется на одиночный дефект в виде обрыва одной ячейки из-за отсутствия индиевого микроконтакта. При формате БИС считывания 256x256 элементов неисправность одной шины приводит к дефектности в 0,4%, а одной ячейки всего лишь в 0,0015%.

1. Патент на изобретение №2388110. Заявка №2009105899 от 19.02.2009. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27.04.10. Акимов В.М., Васильева Л.А., Климанов Е.А., Лисейкин В.П.

A09 Принципы построения специализированных фоточувствительных матриц ПЗС

Акимов В.М.

ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

Предложены три варианта построения матриц ПЗС и способов управления переносом накопленной информации.

1. Известен вариант строчной организации матрицы ПЗС, содержащий одну секцию накопления информации и реализующий временной способ разделения этапов накопления и считывания [1]. Он в основном используется в режиме временной задержки и накопления заряда. Для преобразования изображений такие матрицы применяются редко из-за паразитной засветки накопленной информации при ее считывании. Рассмотрена конструкция матрицы ПЗС и последовательность тактовых импульсов [2], позволяющие уменьшить паразитную засветку примерно до той же величины, как и в матрицах с кадровым переносом. Использование таких матриц ПЗС позволяет сократить вдвое площадь матрицы по сравнению с матрицами ПЗС с кадровой организацией при сохранении той же разрешающей способности изображения.

2. Стандартные двумерные матрицы ПЗС имеют линейную организацию потоков зарядов, однако, изменяя взаимосвязь между отдельными электродами, можно создать устройство, в котором матрица будет обладать двухкоординатным переносом зарядов и, следовательно, получит новые возможности для специализированной обработки информации. Сдвиг зарядовых пакетов в требуемом направлении осуществляется выбором соответствующей импульсной последовательности.

Известная конструкция четырехфазной матрицы ПЗС, предназначенная для переноса зарядов в горизонтальном и вертикальном направлениях, имеет 6 шин

тактового питания [3]. При этом зарядовые пакеты в вертикальном направлении передаются через одноименные электроды основного – горизонтального направления.

Однако если зарядовую связь осуществить между соответствующими разноименными электродами каждой горизонтальной строки, то число электродов, необходимое для переноса зарядов в вертикальном направлении, можно уменьшить до одного. Такая организация структуры и тактового питания матрицы ПЗС позволяет упростить конструкцию и уменьшить ее площадь примерно на 10-15% в зависимости от формы и размеров электродов, что дает увеличение процента выхода годных структур в 2-3 раза [5].

3. Матрицы ПЗС позволяют анализировать информацию по мере ее направленного движения к выходу. Так, например фоточувствительная матрица ПЗС может быть использована для распознавания объектов, имеющих локальные особенности изображений. Применение для этих целей оптических систем с блоком диафрагм различной ориентации [6], во-первых, усложняет устройство распознавания и, во-вторых, вносит значительные потери светового потока от 10 до 50 раз в зависимости от размеров диафрагм. При использовании матрицы ПЗС для анализа изображений ее ориентируют так, чтобы направление сдвига зарядов совпадало с выбранной ориентацией. В этом случае потери оптического сигнала отсутствуют, а число фоточувствительных матриц ПЗС равно числу выделяемых локальных особенностей изображения [7]. Для подобного анализа изображений можно использовать только одну, описанную выше матрицу с двухкоординатным переносом информации. При этом анализ проводится последовательно для каждой локальной особенности. Дополнительные преимущества таких матриц состоят, во-первых, в возможности выделений не только ориентированных отрезков линий объекта, но и криволинейных фигур, например дуг, и, во-вторых, в возможности оперативного выбора вида анализируемой локальной особенности изображения.

Литература.

1. Носов Ю.Р., Шилин В.А. Основы физики приборов с зарядовой связью. М.: Наука, 1986.
2. Способ считывания информации в запоминающей светочувствительной матрице на приборах с зарядовой связью. Акимов В.М., Поляков И.В., А.С. СССР №976795.
3. Sequin C.H. Two Dimensional Charge Transfer Arrays, IEEE J. of Solid State Circuits, SC-9, 134-142 (1974).
4. Матрица приборов с зарядовой связью. Акимов В.М., А. С. СССР № 1168024.
5. Пресс Ф. П. Формирователи видеосигнала на приборах с зарядовой связью. М.: «Радио и связь» 1981.
6. Пат. ФРГ, кл. G06K9/08, №2449362, 1980.
7. Способ выделения ориентированных элементов изображения. Акимов В.М., Мазо Б.Л., Пресс Ф.П. А.С. СССР №1059690.

А10 Разработка и исследование кремниевых приемников излучения повышенной чувствительности

Акимов В.М.

ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

Использование ФП с внутренним усилением сигнала позволяет улучшить реальную пороговую чувствительность ФПУ, в значительной степени упростить

систему предварительной обработки видеосигнала (схем сопряжения, усиления и коммутации), а также конструкцию устройства в целом.

Имеется достаточно сообщений об элементарных и комбинированных фотоприемниках, имеющих коэффициент усиления до 10^4 . Однако такое усиление достигается либо за счет усложнения технологии изготовления, или за счет использования фотоприемников в неустойчивых режимах, например, лавинного умножения, либо за счет значительного усложнения конструкции фотоячейки, что, в конечном итоге, затрудняет интеграцию таких приборов. В ряде случаев необходимо производить считывание оптической информации в условиях низкой освещенности. При этом световая мощность, падающая на фотоприемную ячейку на 5-7 порядков ниже рабочей мощности логических элементов ИС. Такие сигналы не только не согласуются с каналами связи ЭВМ, но и не могут быть надежно считаны с матрицы ввиду неизбежных шумов и тактовых помех. Это приводит к необходимости как предварительного усиления сигнала непосредственно в фотоприемной ячейке, так и дополнительного усиления сигнала внешними схемами. Естественным выходом является такая организация системы, при которой сигнал внутри каждой приемной ячейки усиливается до уровня, согласованного с логическими элементами как энергетически, так и по напряжению.

В докладе рассмотрен комбинированный приемник излучения на основе объединения структур биполярного и МДП транзисторов. Прибор работает при сверхмалых уровнях освещенности и изготавливается по стандартной технологии кремниевых планарных транзисторов. Важное достоинство разработанного фотопреобразователя состоит в возможности автоматического управления величиной коэффициента усиления от $K=Вст.$ транз. до 10^6 раз, что позволяет считывать оптическую информацию в широком диапазоне освещенностей.

Разработаны и испытаны две базовые структуры БПФТ, отличающиеся конструкцией, режимом работы и эксплуатационными характеристиками, а также их модификации. Фотоприемник сохраняет высокий коэффициент усиления в активной области, области насыщения и в фотогальваническом включении. БПФТ может быть использован как в режиме непрерывной регистрации излучения, так и в режиме накопления заряда.

Проведено сравнение параметров разработанного фотоприемника с известными.

Функционирование БПФТ в требуемом спектральном диапазоне обеспечивается легированием соответствующими примесями или применением гетеропереходов.

Отличительной особенностью разработанного фотоприемника от известных является возможность индивидуальной подстройки коэффициента усиления каждого прибора в фотоприемной матрице после ее изготовления, что позволит свести разброс параметров составляющих ее элементов к минимуму.

А11 Фотоэлектрические преобразователи ультрафиолетового излучения на основе сульфоселенида цинка

Джафаров М.А.

Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан

В последние годы развивается новое поколение приборов, основой функционирования которых является использование фотоэлектрических преобразователей (ФП) ультрафиолетового (УФ) излучения. Приборы создаются в связи с требованиями УФ локации, дозиметрии жесткого УФ излучения, экологии, и т. д.

Современные потребности оптоэлектроники и фотоэнергетики направлены, в первую очередь, на снижение себестоимости соответствующих фотопреобразователей, особенно фотопреобразователей солнечной энергии в электрическую. В связи с этим экономичность и технологичность поликристаллов сплошных полупроводниковых материалов (соединений и твердых растворов) стимулирует их перспективность для изготовления эффективных солнечных фотоэлементов на их основе. Известно, что одним их подходящих для этих целей методов, является электрохимическое осаждение сложных полупроводниковых материалов из раствора, который позволяет получить гетеропереходы также с достаточно большой площадью.

Исследуемый в настоящей работе сульфид цинка относится к перспективным материалам УФ фотоэлектроники, на основе которых можно получить эффективные ФП, нечувствительные к видимому излучению. Изготовление эффективного ФП до сих пор сдерживалось рядом технологических трудностей, связанных с необходимостью получения низкоомной пленки ZnS и созданием к ней омического контакта.

В настоящей работе сообщается о получении плавных варизонных слоев ($ZnS_{1-x}Se_x$) с поликристаллической структурой, использование которых позволило реализовать оригинальную возможность решения указанной проблемы. С этой целью фотоактивный гетеропереход *p*-Si - *n*-ZnS выращивается на подложке Si с варизонным слоем. Предлагаемый метод получения отличается от известных методов тем, что варизонные слои выращиваются путем электрохимического осаждения халькогенидов цинка и кадмия. В качестве исходных реактивов для получения комплексов и сульфоселенидов цинка и кадмия использовались следующие основные реактивы: цинк азотнокислый $Zn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, соли кадмия ($CdCl_2$), селеномочевина $CSe(NH_2)_2$, тиосульфат натрия $Na_2S_2O_3$, водный раствор аммиака $NH_3 \cdot H_2O$. Электроосаждение проводилось в потенциостатическом режиме при потенциале $E = -0,3$ В. Осаждение осуществлялось как в темноте, так и при освещении Si электрода белым светом. Потенциал электросинтеза в обоих случаях был более положительным, чем равновесный потенциал системы. Проведены исследования ВАХ, ВФХ и спектральной зависимости квантовой эффективности полученных структур. Изучены также влияния ТО на фотоэлектрические свойства исследуемых гетероструктур.

Указанная концентрация электронов в поликристаллических слоях достигалась без дополнительного легирования посторонней примесью. Регулируя концентрацию собственных дефектов решетки путем изменения условий приготовления кристаллов, можно варьировать в широком диапазоне концентрацию свободных носителей в полученных образцах. Концентрация электронов в ZnS при эпитаксиальном выращивании их на подложках существенно зависела от параметров подложек.

Исследованы элементный состав и его изменение по толщине структур и определен профиль распределения элементов в системе. Построена энергетическая зонная диаграмма изучаемых структур. Для изучаемых структур получен важный результат, из которого следует, что, меняя параметры одной из решеток, можно управлять свойствами наращиваемых слоев. Дефекты решетки донорного типа в подложках халькогенида кадмия стимулируют образование соответствующих дефектов в наращиваемых слоях, приводя в конечном итоге к росту относительно низкоомного ZnS. Концентрация цинка постоянна по толщине пленки, концентрация халькогенида меняется от поверхности вглубь пленки. Наблюдаемое распределение элементов свидетельствует о наличии в исследуемых материалах плавного перехода от твердого раствора с избытком серы к твердому раствору с избытком селена.

Тонкопленочный поликристаллический вариант ФП не препятствует достижению параметров вольт-амперной характеристики, находящихся на уровне лучших аналогов в монокристаллическом исполнении.

Спектры фототока преобразователей характеризуются существованием электрического поля, разделяющего генерированные светом носители и в части варизонного слоя, т.е. спектральной области за краем собственного поглощения ZnS. Протяженность указанной части варизонного слоя, зависящая от градиента валентной зоны и от толщины слоя ZnS, определяет длинноволновую границу фотоэффекта. Итогом проведенных исследований свойств гетероструктур является создание эффективного и стабильного УФ датчика на основе сульфида цинка. Эффективное использование в качестве прозрачной составляющей поверхностно-барьерного ФП Si стало возможным благодаря созданию технологии выращивания сверхтонкой стабильной пленки CdS, обволакивающей поверхность зерен поликристаллического ZnS. При правильном выборе параметров подложек применение варизонных слоев позволяет без дополнительного легирования посторонней примесью всех составляющих гетероструктуры достичь оптимальных характеристик поверхностно-барьерного ФП, реализовать достаточно большие электрические поля на контакте Si-ZnS и решить проблему создания тыльного омического контакта к ZnS. Контролируя протяженность ОПЗ в варизонном слое, можно управлять краем длинноволновой чувствительности ФП и создавать полосовые УФ датчики.

A12 Многоэлементные приемники излучения на основе $Pb_{1-x}Cd_xSe$ для спектрального диапазона 1,5-5,0 мкм

Анисимова Н.П., Варфоломеев С.П., Петровская З.Н., Тропина Н.Э.

ОАО «НИИ «Гириконд», Санкт-Петербург, Россия

Разработка и внедрение новых принципов построения оптоэлектронных приборов, работающих в ближней и средней инфракрасных областях спектра, требуют создания недорогих, надежных и быстродействующих многоэлементных приемников излучения.

Селенид свинца и его твердые растворы являются перспективными материалами для создания фоточувствительных структур, работающих в спектральном диапазоне 1,5-5,0 мкм [1, 2]. Базовая технология, разработанная на предприятии ОАО «НИИ «Гириконд» [3], дает возможность получать композитные пленки на основе PbSe и его твердых растворов $Pb_{1-x}Cd_xSe$. Несмотря на сложное морфологическое строение пленок, получаемых термическим осаждением в вакууме с последующей высокотемпературной обработкой [4], удается создавать многоэлементные линейные фотогальванические структуры с высоким уровнем чувствительности. При этом относительное среднеквадратичное отклонение параметров массива фоточувствительных элементов составляет не более 20 % (рис. 1). Существующие возможности фотолитографического процесса позволяют создавать многоэлементные линейные приемники с количеством до 100 элементов и с линейными размерами одного элемента от 30 мкм до 300 мкм, работающие в фотогальваническом (токовом) режиме (рис. 2).

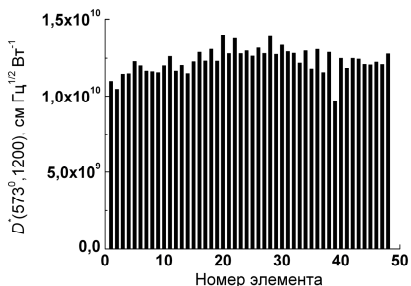


Рис. 1. Топограмма удельной обнаружительной способности линейной 48-ми элементной структуры

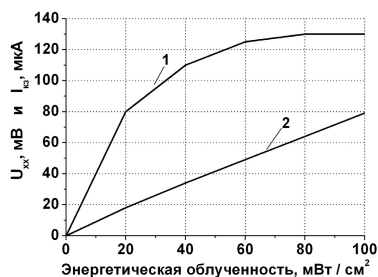


Рис. 2. Вольт- (1) и ампер-ваттная (2) характеристики фотогальванического приемника

Спектральные характеристики fotocувствительности зависят от состава полупроводниковой пленки, таким образом что с увеличением содержания CdSe в твердом растворе $Pb_{1-x}Cd_xSe$ максимум спектральной чувствительности сдвигается в сторону коротких длин волн, а постоянная времени увеличивается от 5 мкс до 30 мкс.

Для термостабилизации в конструкции многоэлементного приемника применяется термоэлектрический охладитель.

Литература

Рекомбинационные процессы в поликристаллических пленках селенида свинца / Н. П. Анисимова, Т. Р. Глобус, Л. К. Дийков, Ю. В. Калинин, Т. Г. Николаева, А. О. Олеск // ФТП. – 1983. – Т.17, вып. 3. – С.534–537.

Подвижность дырок и электронов в поликристаллических fotocувствительных слоях $PbSe$ / Н. П. Анисимова, Т. Р. Глобус, Т. Г. Николаева, А. О. Олеск // ФТП. – 1987. – Т.21, вып. 1. – С.37–41.

А. с. 1007970 РФ, МКИ³ В 25 J 15/00. Тонкопленочный фотогальванический ИК-преобразователь и способ его изготовления / Л. К. Дийков, Н. Д. Малькова, А. О. Олеск и др. - № 248106, заявл. 02.02.87.

Влияние диэлектрической фазы на спектр фотолуминесценции фрактально структурированных нанокомпозитных пленок селенида свинца / Н.Э. Тропина, З.Н. Петровская, И.О. Черноглазова // ФТП. – 2009, Т. 43, вып. 11. – С. 1477-1480.

А13 Технология выращивания автоэпитаксиальных структур арсенида индия для ИК-ФПУ и химико-механическая обработка поверхности

Ковалишина Е.А., Петров А.С., Севастьянов Е.Н., Степанов Р.М.

ОАО «ЦНИИ «Электрон», Санкт-Петербург Россия

Автоэпитаксиальные структуры арсенида индия диаметром 76 мм используются для создания на их основе fotocувствительных мишеней инфракрасных fotocувствительных устройств (ИК ФПУ) [1]. Качество изображения, получаемого, на ИК ФПУ зависит, в том числе от отсутствия точечных дефектов на поверхности эпитаксиального слоя. В свою очередь, бездефектность эпитаксиального слоя во многом определяется подготовкой подложек. В настоящей работе исследуется влияние

режимов химико-механической полировки (ХМП) подложек для эпитаксии на вероятность возникновения точечных дефектов на поверхности эпитаксиального слоя.

Эпитаксиальные слои InAs выращивались из газовой фазы по хлоридно-гидридной методике при атмосферном давлении в реакторе вертикального типа.

Химико-механическая полировка пластин InAs производилась двумя способами: с использованием суспензии на основе аэросила А-380 с добавлением моноэтаноламина и с использованием безабразивного состава на основе трилона Б и перекиси водорода. В первом случае скорость полировки не превышала 0,3 мкм/час, во втором достигала 1,5 мкм/час.

Исследование поверхности пластин с использованием атомно-силового микроскопа СОЛБЕР Р47Н-PRO показало, что при полировке аэросилом параметры шероховатости Rq (среднеквадратичное отклонение) и Ra (среднеарифметическое отклонение) составляли 1,0-1,4 нм и 0,8-1,1 нм соответственно, при этом наблюдались отдельные пики (Rmax) высотой до 40 нм. Типичный профиль поверхности после ХМП с применением аэросила показан на Рис 1.

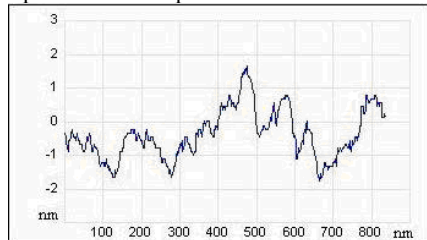


Рис.1 Профилограмма поверхности InAs после ХМП аэросилом

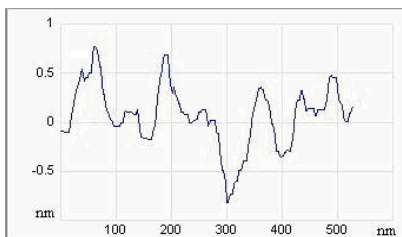


Рис.2 Профилограмма поверхности InAs после ХМП в трилоне Б и H₂O₂

Пики высотой до 40 нм исследовались с использованием технологии сфокусированного ионного пучка (FIB) [2] на установке Strata FIB 205 xP. Было установлено, что они представляют собой частицы, адсорбированные на поверхности InAs. Изображение таких частиц показано на Рис 3. Можно предположить, что эти частицы представляют собой конгломераты из частиц аэросила (размер используемых частиц аэросила 5-15 нм).

На возможность образования таких конгломератов указывалось в [3]. Плотность таких частиц обычно составляет $10^3 - 10^4 \text{ см}^{-2}$ что коррелирует с плотностью точечных дефектов на поверхности эпитаксиального слоя выращенного на подложке, приготовленной по этой технологии. Изображение такого дефекта, полученное с помощью оптического микроскопа, представлено на Рис. 4. Ранее было показано[4], что подобные дефекты зарождаются на границе раздела слой – подложка, что также подтверждает предположение о том, что они зарождаются на конгломератах частиц аэросила.

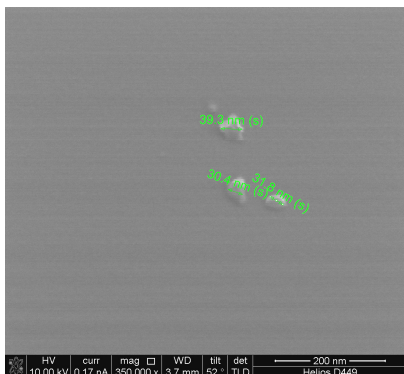


Рис.3 Конгломерат частиц аэросила на поверхности подложки после ХМП

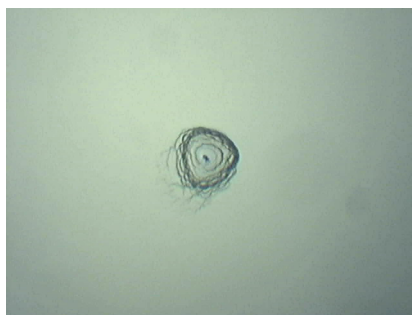


Рис. 4 Точечный дефект на поверхности эпитаксиального слоя, выращенного на подложке отполированной аэросилом

Для исключения дефектов такого типа была предложена безабразивная методика ХМП с использованием состава на основе трилона Б и перекиси водорода.

Использование безабразивной ХМП обеспечивает заметно лучшую шероховатость поверхности при полном отсутствии частиц сопоставимых по размеру с конгломератами частиц аэросила ($R_q = 0,30-0,35$ нм, $R_a = 0,24-0,28$ нм, $R_{max} = 2-6$ нм). Профилограмма поверхности после безабразивной ХМП показано на рис.2.

Разработанная безабразивная методика ХМП обеспечивает получение подложек с высокой степенью чистоты поверхности, что позволяет получать эпитаксиальные структуры свободные от поверхностных дефектов.

Литература

1. Ковтонюк Н.Ф., Мисник В.П., Соколов А.В. Прикладная физика 2005. № 6 с.134-140.
2. Лучинин В. В., Савенко А. Ю., Тагаченков А. М. Петербургский журнал электроники 2005 №2 с.3-19
3. Р.В.Гольдштейн, М.Н.Осипенко. Вестник Пермского национального исследовательского университета 2011, №3 с.26-42
4. Грама Д.М., Петров А.С., Попов С.Д., Степанов Р.М., Чилаева Е.В. Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. 2008. №7. С. 13-18

A14 **Исследование дефектов в ГЭС КРТ, выращенных методом МЛЭ на альтернативных подложках**

^{1,2}Бурлаков И.Д., ¹Кортаев Е.Д., ¹Яковлева Н.И., ¹Мирофяненко А.Е., ¹Сизов А.Л.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

В настоящее время в технологии ФГУП «НПО «Орион» используются полупроводниковые многослойные гетероэпитаксиальные структуры теллурида кадмия ртути, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) для изготовления матричных фотоприемных устройств [1,2], в том числе мультиспектральных, параметры которых напрямую зависят от качества исходного материала. Тройные

соединения HgCdTe являются почти идеальным инфракрасным материалом для фотоприемников. Это обусловлено тремя главными особенностями: изменяемая ширина запрещенной зоны, которая позволяет получать фоточувствительные приборы, работающие в спектральном диапазоне от 1 до 30 мкм, большие коэффициенты поглощения, обеспечивающие высокую квантовую эффективность и относительно высокая рабочая температура.

Развитие новых методов выращивания $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, и прежде всего, молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), позволило решить ряд технологических проблем и создать структуры большого размера. Молекулярно-лучевая эпитаксия предоставляет возможность оптимизировать характеристики инфракрасных детекторов на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ путем создания гетероэпитаксиальных структур с заданным распределением состава (мольной доли CdTe) по толщине, типом проводимости и концентрации примеси. Однако даже небольшое изменение температуры относительно оптимального значения T_{opt} приводит к значительному изменению плотности дефектов. Поэтому основными недостатками при выращивании HgCdTe считаются неоднородность состава и ростовые дефекты, наиболее распространенные из которых включают микропоры, холмики, V-дефекты и игольчатые кристаллиты.

Для практического использования гетероэпитаксиальные структуры КРТ должны обладать строго определенным набором свойств, которые во многом обусловлены физическими и физико-химическими процессами, происходящими при выращивании и последующей термической обработке материала. Для выяснения типа и плотности дефектов проведены анализ морфологии поверхности и кристаллического совершенства структур, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией на подложках из арсенида галлия с ориентацией (310) и кремния методами автоматизированного оптического анализа поверхности, атомносиловой микроскопии (АСМ), сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии.

Было обнаружено, что по типу образования V-дефект обычно представляет собой макродефект протяженностью от нескольких единиц до десятков микрометров. В литературе [3] его часто называют высокотемпературным дефектом. Визуальный анализ с помощью электронной и атомно-силовой микроскопии показал, что все V-дефекты имеют одинаковую структуру. На рис. 1 (а, б) приведено трехмерное изображение V-дефекта, полученное на атомно-силовом микроскопе.

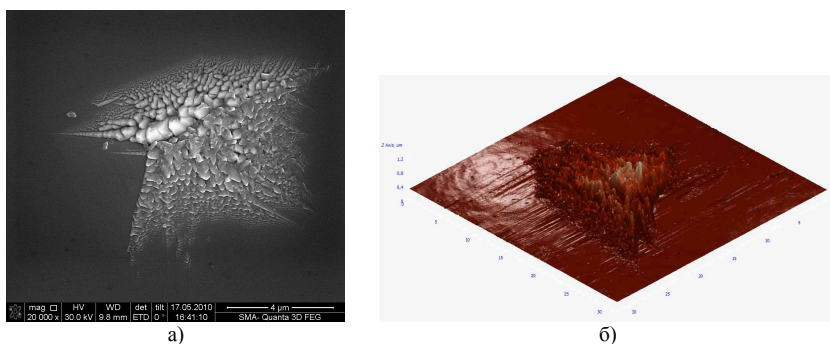


Рис. 1 – Трехмерное изображение изображения V-дефекта

Структурный анализ показывает, что V-дефект состоит из множества поликристаллитов, поперечные размеры которых могут достигать от 0,5 до 1,5 мкм, а высота - от 300 нм до 1 мкм.

Представленные в работе результаты отражают особенности распределения ростовых дефектов по площади ГЭС КРТ и количество ростовых дефектов на см². Проведенные исследования V-дефектов методом атомно-силовой микроскопии позволяют определять их форму, размеры и особенности кристаллизации. Причинами возникновения V-дефектов могут являться различные несовершенства, включая микропоры и кратеры, места зарождения дислокаций, преципитаты теллура, несовершенства кристаллической решетки, частицы инородных веществ и загрязнений.

1 Boltar K.O., Burlakov I.D., Filachev A.M., Klimanov E.A., Ponomarenko V.P., Solyakov V.N., Stafeev V.I. Single and Matrix HgCdTe Photovoltaic Detectors // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – v. 16. – № 4. – 2007 – p. 234-247.

2 Boltar K.O., Burlakov I.D., Ponomarenko V.P., Yakovleva N.I., Klimanov E.A., Akimov V.M. Line Integration HgCdTe Focal Plane Array. // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – v. 17. – № 1. – 2008. – p. 9.

3 E. Selvig, C. R. Tonheim, K. O. Kongshaug, T. Skauli, H. Hemmen., T. Lorentzen and R. Haakenaasen, Defects in CdHgTe grown by molecular beam epitaxy on (211)B-oriented CdZnTe substrates. // J. Vac. Sci. Technol. B 26(2), Mar/Apr 2008.

A15 **Метод определения квантовой эффективности и темнового тока фоточувствительных элементов матричных ФПУ**

¹Патрашин А.И., ^{1,3}Бурлаков И.Д., ^{1,2}Болтарь К.О., ^{1,2}Дирочка А.И., ^{1,2}Никонов А.В.,
¹Яковлева Н.И.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

³ МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

МФЧЭ определяет все важнейшие характеристики МФПУ. Этими характеристиками являются: пороговая облученность (NEI), пороговая мощность (NEP), удельная обнаружительная способность (D^*), пороговая разность температур (NETD), динамический диапазон, токовая и вольтовая чувствительности, однородность характеристик по площади МФЧЭ, заданное возможное количество дефектных ФЧЭ.

Параметрами, ответственными за эти характеристики, является квантовая эффективность и темновой ток ФЧЭ. Практически, они определяют все характеристики ИК МФПУ.

Для нормальной работы МФПУ чрезвычайно важно, чтобы однородность этих параметров по всем ФЧЭ была бы не хуже заданной величины. Кроме этого, необходимо, чтобы величина темнового тока I_T не превышала некоторое граничное значение I_0 , а величина квантовой эффективности η была бы не ниже граничного значения η_0 . Все ФЧЭ, не удовлетворяющие подобным требованиям, считаются дефектными. Для современных МФПУ количество дефектных элементов не должно превышать величину от 0,1 до 1 %.

По этим причинам необходим надежный, автоматизированный и корректный метод контроля величины квантовой эффективности и темнового тока каждого ФЧЭ ИК МФПУ с целью определения количества дефектных элементов в матрице.

Облучим МФПУ протяженным АЧТ. Если все ФЧЭ «видят» сквозь охлаждаемую диафрагму только однородный по температуре фон, который получается при расположении протяженного АЧТ на расстоянии, не превышающем заданную величину, то сигнал каждого ФЧЭ описывается следующим выражением:

$$U_{\phi ij} = M_{1ij}(\tau_0) \cdot I_{Tij} + M_{2ij}(\tau_0, T) \cdot \eta_{ij} + U_{constij}$$

где $M_{1ij}(\tau_0)$ и $M_{2ij}(\tau_0, T)$ – известные величины,
 i, j – номер ФЧЭ в матрице

Сигнал ФЧЭ содержит три неизвестные величины – темновой ток I_T , квантовую эффективность η и напряжение U_{const} , соответствующее нулевому сигналу ФЧЭ. Следовательно, если провести три измерения сигналов всех ФЧЭ при разных условиях, то для каждого из них мы получим систему трех уравнений с тремя неизвестными I_T , η и U_{const} . Решая такую систему уравнений относительно темнового тока, квантовой эффективности и U_{const} , мы определим указанные параметры.

Для оптимизации первое измерение сигнала проводится при $\tau_n = 0$. При этом автоматически определяется величина $U_{constij}$. Второе измерение сигнала проводится при значении $\tau_n = \tau_0$ и температуре АЧТ T_1 . Третье измерение проводится при $\tau_n = \tau_0$ и температуре АЧТ $T_2 = T_1 \pm \delta T$.

Решая вышеуказанную систему уравнений относительно I_{Tij} и η_{ij} получим следующие выражения для их определения:

$$\eta_{ij} = \frac{\Delta U_{ij}}{\delta N_{\phi ij}(T_1, \delta T)} \cdot \frac{C_n}{\tau_n}$$

$$I_{Tij} = \left[U_{1ij} - U_{constij} - \frac{N(T_1) \cdot \Delta U_{ij}}{\delta N_{\phi ij}(T_1, \delta T)} \right] \cdot \frac{C_n}{\tau_n}$$

где $\Delta U_{ij} = U_{2ij} - U_{1ij}$ – разность измеренных сигналов, В;
 C_n – накопительная емкость в ячейке мультиплексора.

Величина $\delta N_{\phi ij}(T_1, \delta T)$ измеряется или точно рассчитывается по следующей формуле:

$$\delta N_{\phi ij}(T_1, \delta T, \lambda_1, \lambda_2) = N_{\phi ij}(T_2) - N_{\phi ij}(T_1),$$

Здесь $N_{\phi ij}(T_1)$ и $N_{\phi ij}(T_2)$ – расчетные экспериментально-конструктивные параметры, определяемые следующими соотношениями [1]:

$$N_{\phi ij}(T_1) = K_0 \cdot K_1 \cdot K_{npj} \cdot N_0(T_1)$$

$$N_{\phi ij}(T_2) = K_0 \cdot K_1 \cdot K_{npj} \cdot N_0(T_2)$$

где $N_0(T_1)$ и $N_0(T_2)$ – рассчитанные или измеренные величины интегральных облученностей, создаваемых АЧТ с температурами T_1 и T_2 , фотонов/см²·с;

K_0 – известный коэффициент пропускания окна МФПУ;

K_1 – известный коэффициент пропускания охлаждаемого светофильтра;

K_{npj} – известный коэффициент пропускания холодной диафрагмы для ФЧЭ с индексами ij .

Вся обработка массивов автоматически проводится на компьютере.

В качестве примера на Рис. 1, 2 приведены диаграммы измеренных массивов η_{ij} и I_{Tij} части матрицы ИК МФПУ на основе антимонида индия размером 10x10 ФЧЭ [2].

В результате, определив параметры всех ФЧЭ, можно автоматически рассчитать все параметры МФПУ [

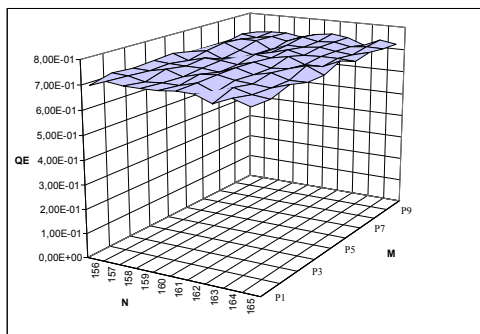


Рис. 1 Диаграмма квантовых эффективностей МФЧЭ 10x10 на основе InSb

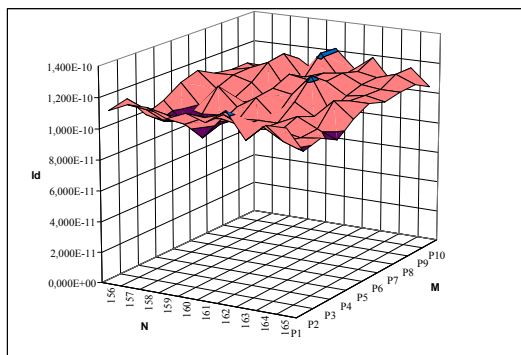


Рис. 2 Диаграмма темновых токов МФЧЭ 10x10 на основе InSb

Литература

- [1] А.И. Патрашин, Метод расчета параметров ИК матричного фотоприемного устройства, Прикладная физика, № 2, 2010, С. 103.
 [2] А.И. Патрашин, И.Д. Бурлаков, А.А. Лопухин, Н.И. Яковлева, Экспериментальное исследование метода расчета параметров ИК МФПУ, Прикладная физика, готовится к печати.

A16 Исследование механизмов протекания тока в *p-i-n* фотодиодах на основе AlGaIn

^{1,2}Болтарь К.О., ^{1,2}Васюков И.О., ¹Яковлева Н.И.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

Вольтамперные характеристики (ВАХ) фотодиодов широко используются для исследований и контроля качества элементов фотоприемных устройств на основе тройных соединений AlGaIn. На основе фундаментальных теоретических зависимостей различных токовых составляющих строится математическая модель ВАХ, включающая основные параметры фотодиодов и характеристики материала [1].

В работе рассмотрена и построена модель ВАХ $p-i-n$ фотодиода на основе гетероэпитаксиальных структур тройных соединений AlGaIn, для которой проанализированы возможные механизмы протекания тока, выполнено моделирование квантовой эффективности и спектральной характеристики чувствительности.

В $p-i-n$ переходах, сформированных на основе широкозонных полупроводников, диффузионная составляющая тока мала при обратных напряжениях и малых прямых напряжениях смещения по сравнению с генерационно-рекомбинационной составляющей из-за малой концентрации неосновных носителей заряда. Вследствие этого, генерационно-рекомбинационная составляющая тока является определяющей в составе полного тока [2]. Она обусловлена захватом свободных носителей ловушками или центрами дефектов. Если данные центры локализованы в верхней половине запрещенной зоны, они захватывают и отдают электроны, обмениваясь носителями с зоной проводимости. Если центры находятся в нижней половине запрещенной зоны, они захватывают и отдают дырки, обмениваясь носителями с валентной зоной. Центры захвата, находящиеся в центре запрещенной зоны, являются наиболее эффективными, т.к. они захватывают и эмитируют как электроны, так и дырки.

При некоторых допущениях плотность генерационно-рекомбинационного тока при обратном напряжении смещения можно описать выражением в зависимости от ширины области обеднения W

$$J_{GR} = -\frac{q n_i W}{\tau_D}$$

где q – заряд электрона, (кулон), n_i – собственная концентрация носителей заряда (см^{-3}), τ_D – эффективное время жизни носителей заряда (сек), W – ширина области обеднения (см).

Генерационно-рекомбинационная составляющая тока пропорциональна ширине области обеднения и обратно пропорциональна эффективному времени жизни носителей заряда, которое в свою очередь зависит от концентрации ловушек.

Другим важным механизмом, определяющим плотность тока при обратном смещении, является прыжковый механизм, связанный с захватом электронов ловушками [3]. При этом изменение концентрации электронов будет прямо пропорционально концентрации ловушек в полупроводнике.

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = -k_r n N_t$$

где k_r – коэффициент; N_t – концентрация ловушек.

Эффект Пула-Френкеля [4] подобен эффекту Шоттки, при котором поле уменьшает потенциальный барьер и позволяет электронам более свободно эмитировать в зону проводимости. Плотность тока в случае эффекта Пула-Френкеля находится из выражения:

$$j = j_0 \exp\left(\frac{\beta_{PF} E^{1/2}}{c k T}\right)$$

где j_0 – плотность тока при малых полях, β_{PF} – константа Пула-Френкеля, E – напряженность электрического поля, k – постоянная Больцмана, T – температура.

Прямая темновая ветвь ВАХ фотодиода на основе гетероструктур AlGaIn/GaN построена с учетом вкладов диффузионной, генерационно-рекомбинационной составляющих тока и токов утечек. При больших напряжениях прямого смещения ток через $p-i-n$ фотодиод ограничен последовательным сопротивлением контактов и i -области.

Обратный темновой ток в основном определяется генерационно-рекомбинационной составляющей, а также зависит от эффекта прыжковой проводимости, токов утечек и влияния эффекта Пула-Френкеля при больших ($V \geq 6$ В) напряжениях обратного смещения.

На основе экспериментальных данных [5] предложена аналитическая зависимость коэффициента поглощения $Al_xGa_{1-x}N$ от состава x . С использованием данной численной модели построены квантовая эффективность и спектральная характеристика чувствительности p - i - n фотодиода. Предложенные модели и расчеты показывают хорошее соответствие рассчитанной квантовой эффективности с экспериментальными данными, полученными в работах [6] и [7].

Литература

- [1] K.O. Boltar, N.I. Iakovleva, Research, Development, and Production Ctr. ORION (Russia), HgCdTe photodiodes current-voltage characteristics simulation [5126-06] // Proceedings of SPIE Vol. 5126, 2003, pp.43-51.
- [2] Sah, C.T., Noyes, R.N. and Shockley, W. (1957) Proceedings of IRE, 45, 1228.
- [3] Morgan, M. and Walley, P.A. (1971) Localized conduction processes in amorphous germanium. Philosophical Magazine, 23, 661–671.
- [4] Buchwald, W.R. and Johnson, N.M. (1988) Revised role of the Poole–Frenkel effect in deep level characterization. Journal of Applied Physics, 62 (2), 958–961.
- [5] Shang L., Xiaobing L., LED Packaging for Lighting Applications: Design, Manufacturing and Testing, p. 100, (2001)
- [6] P. Lamarre etc. AlGa N p-i-n Photodiode Arrays for Solar Blind Applications. Mat. Res. Soc. Symp. Vol. 639 (2001)
- [7] M. B. Reine etc. Solar-Blind AlGa N 256×256 p-i-n Detectors and Focal Plane Arrays. Proc. of SPIE Vol. 6119 pp.611901-1 -611901-15 (2006).

A17 Исследование высоколегированных подложек InSb

^{1,2}Бурлаков И.Д., ¹Мирофянченко А.Е., ¹Яковлева Н.И., ¹Коротаев Е.Д.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МИРЭА (Технический университет). Москва, Россия

Геретозпитаксиальные структуры тройного соединения кадмий-ртуть теллур (ГЭС КРТ) считаются одним из наиболее перспективных материалов для производства матричных фотоприемных устройств (МФПУ) для ближнего, среднего и дальнего инфракрасных диапазонов спектра. Близкие параметры кристаллических решеток эпитаксиальных слоев КРТ (0,3 %) и возможность изменять ширину запрещенной зоны от 0 до 1,6 эВ делают этот материал универсальным и удобным для использования [1]. Однако имеются некоторые несовершенства, к которым можно отнести тот факт, что при малых изменениях ширины запрещенной зоны состав материала меняется достаточно сильно, что приводит к неоднородности состава по образцу КРТ. Поэтому антимонид индия можно рассматривать как материал альтернативный КРТ в средневолновом спектральном диапазоне [2]. Этот материал имеет малые темновые токи, почти на два порядка меньше, чем у КРТ, что при уменьшении собственных шумов делает антимонид лучшим материалом для средневолновых применений.

В настоящее время ФГУП «НПО «Орион» производит фотоприемные устройства на основе матриц чувствительных элементов из InSb, сформированных ионной имплантацией, гибридизированных с кремниевыми интегральными схемами

считывания с помощью индиевых микроконтактов, и имеющих высокие выходные параметры и бездефектность на уровне 99,5 %.

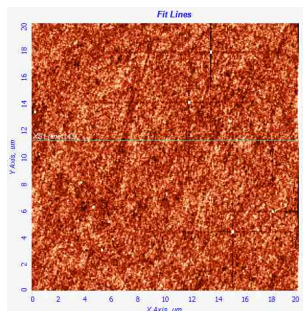
Дальнейшее развитие технологии предполагает выращивание эпитаксиальных структур InSb методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), который позволяет получать пластины большого диаметра с задаваемой в процессе роста структурой и свойствами слоев, хорошей морфологией и плоскостностью поверхности, максимально пригодной для дальнейших технологических операций. Эпитаксиальный слой фоточувствительного материала InSb выращивается на оптически прозрачной в рабочем спектральном диапазоне подложке, поскольку конструкция фотодиодной матрицы такова, что излучение, детектируемое фотодиодами, выполненными в активном эпитаксиальном слое, вводится через подложку.

Гладкая бездефектная поверхность подложки из объемного антимонида индия (InSb) является необходимым условием для выращивания кристаллически совершенных гомоэпитаксиальных слоев, предназначенных для фотоприемных устройств средневолнового диапазона спектра.

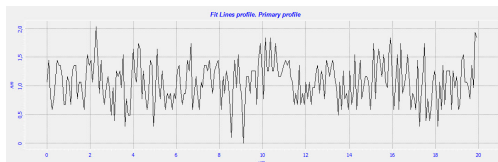
Для этих целей проведена разработка технологических процессов подготовки и контроля поверхности «эпиреди» подложек из высоколегированного InSb, включающих химико-механическое полирование (ХМП), очистку поверхности и контроль качества поверхности различными методами, в том числе уникальным методом исследования морфологии на атомно-силовом микроскопе.

Проведен анализ материала оптически прозрачных подложек различных фирм производителей – полированных пластин сильнолегированного InSb, отвечающих заданным требованиям, с помощью разработанных методик измерений морфологии, нанощероховатости и дефектности. Проведенные исследования показали высокое качество поверхности, достигнутое у контролируемых образцов.

На рис. 1 представлены результаты исследований поверхности подложки; морфологии - (а) и профиля поверхности - (б) вдоль выбранного направления на атомно-силовом микроскопе. Высота нанонеровностей составила 0,5 – 2 нм.



а) морфология поверхности



б) профиль поверхности

Рис.1 результаты исследований поверхности подложки

Комплексное исследование и контроль свойств поверхности, оптических и электрофизических свойств полированных пластин антимонида индия позволяет создать промышленную технологию подложек, пригодных для эпитаксии структур InSb с фоточувствительными свойствами, необходимыми для современной фотоэлектроники.

Литература

1. Boltar K.O., Burlakov I.D., Filachev A.M., Klimanov E.A., Ponomarenko V.P., Solyakov V.N., Stafeev V.I. Single and Matrix HgCdTe Photovoltaic Detectors // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – v. 16. – № 4. – 2007 – p. 234-247.

2. Alex Glozman, Eli Harush, Eli Jacobsohn, Olga Klin, Philip Klipstein, Tuvy Markovitz, Vered Nahum, Erez Saguy, Joelle Oiknine-Schlesinger, Itay Shtrichman, Michael Yassen, Boris Yofis and Eliezer Weiss. High Performance InAlSb MWIR Detectors Operating at 100K and Beyond // Proc. of SPIE Vol. 6206, 62060M, (2006). pp 1-9.

A18 Фотоприемный модуль формата 6×576 элементов на спектральный диапазон 8-10,5 мкм

^{1,2}Болтарь К.О., ^{1,3}Бурлаков И.Д., ¹Яковлева Н.И.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

³ МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

Современные тепловизионные и тепlopеленгационные системы круглосюточного обнаружения, распознавания, наблюдения и разведки ориентированы на использование матричных фотоприемных устройств (МФПУ) второго и третьего поколений, которые регистрируют собственное тепловое излучение объектов, его пространственное распределение и имеют высокую информативность [1]. Наиболее высокая чувствительность систем в дальнем спектральном диапазоне 8...12 мкм достигается при использовании МФПУ с фотодиодными матрицами на основе гетерозипитаксиальных структур теллурида кадмия-ртути (КРТ), обеспечивающих высокую квантовую эффективность [2, 3]. Матрицы фотодиодов гибридируются с кремниевыми большими интегральными схемами считывания для обработки и мультиплексирования сигналов в фокальной плоскости. Линейные системы используют двухмерные сканирующие устройства, реализующие режим временной задержки и накопления (ВЗН) для улучшения параметров.

Для кристалла матрицы формата 6×576 элементов использована топология фоточувствительных элементов с уменьшенным до 14 мкм шагом поперек направления сканирования (рис. 1), которая является наиболее приемлемой для замены изделий формата 4x288 элементов в аппаратуре применения без изменения оптической системы, сканера и блока электронной обработки. Уменьшенные размеры фоточувствительной линейки определяют компактный формат охлаждаемого узла. Изделие имеет выигрыш по эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ) по сравнению с МФПУ формата 4x288 элементов в 1,7 раза.

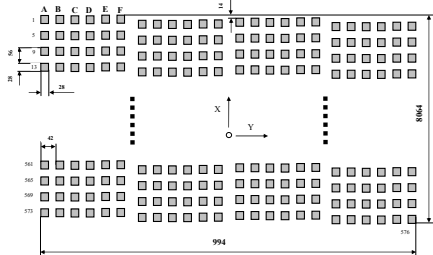


Рис. 1. - Топология фоточувствительных элементов с уменьшенным до 14 мкм

Кристалл кремниевой БИС, входящий в состав ФПМ изготовлен по К-МОП технологии и реализует режим временной задержки и накопления (ВЗН) в зоне криостатирования. Схема замещения неработоспособных элементов в холодной зоне обеспечивает возможность коррекции амплитуды выходного фотосигнала и чувствительности секции ВЗН суммирования, в которой имеются

неработоспособные фоточувствительные элементы. Выходные сигналы мультиплицируются в четыре или восемь информационных каналов. После операции гибридизации охлаждаемая сборка монтируется в технологический криостат для тестирования и исследований параметров.

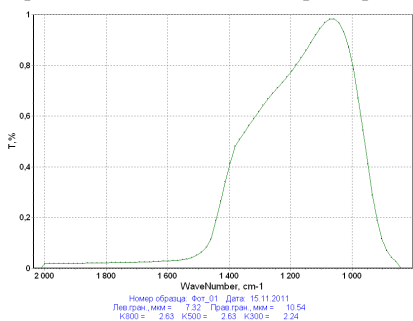


Рис. 2. - Спектральная характеристика фоточувствительности МФПУ формата 6х576 элементов с шагом 14 мкм спектрального диапазона 8-12 мкм

до 10,5 мкм.

Предложенные технические решения позволили повысить удельную обнаружительную способность ФПМ до значений более $2 \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$, а также улучшить разрешающую способность и поле зрения тепловизионных средств по сравнению с тепловизионными средствами, использующими ФПМ формата 4х288 элементов.

Литература

1. Burlakov I.D., Ponomarenko V.P., Filatchev A.M., Degtiarev E.V., Second generation photodetectors for thermal imagers // Applied Physics (Russia). 2007, № 2, p. 43-53.
2. Boltar K.O., Burlakov I.D., Filachev A.M., Klimanov E.A., Ponomarenko V.P., Solyakov V.N., Stafeev V.I. Single and Matrix HgCdTe Photovoltaic Detectors // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – v. 16. – № 4. – 2007 – p. 234-247.
3. Boltar K.O., Burlakov I.D., Ponomarenko V.P., Yakovleva N.I., Klimanov E.A., Akimov V.M. Line Integration HgCdTe Focal Plane Array. // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – v. 17. – № 1. – 2008. – p. 9.

A19 Лазерный осветитель для приборов ночного видения

Белоконев В.М., Волков В.Г., Саликов В.Л.

ОАО «НПО «Альфа», Москва, Россия

Рассматривается лазерный осветитель на основе мощного импульсного лазерного полупроводникового излучателя (ИЛПИ), предназначенный для применения в комплексе с прибором ночного видения (ПНВ). Осветитель обеспечивает активный непрерывный режим работы ПНВ. Осветитель имеет среднюю мощность излучения 0,15 Вт, рабочую длину волны 820-850 нм, угол подсвета $1,5 \times 0,75^\circ$, длительность импульса излучения 120 нс, частоту 5,2 кГц, энергопотребление не более 100 Вт от сети =27 В, масса 7,5 кг. Предлагаемая замена прожекторов инфракрасного (ИК) излучения

на лампах накаливания и газоразрядных лампах на унифицированный малогабаритный прожектор (типа ПЛ-1) на основе эффективного ИЛПИ, позволяет не только увеличить дальность видимости в активном режиме работы, но и повысить помехоустойчивость и эффективность работы комплекса в целом в условиях эксплуатации. Преимуществом применения прожектора ПЛ-1 является и возможность реализации активно-импульсного (АИ) режима работы ПНВ, т.е. применение прожектора в составе АИ ПНВ.

Особо следует рассмотреть вопрос об оптике формирования излучения лазерного прожектора. В простейшем случае в качестве такой оптики может быть использована линза, рассчитанная на минимум сферической аберрации. Такая оптика проста, но из-за значительных аберраций излучение сильно рассеивается вне заданного угла подсвета. Это приводит к энергетическим потерям, достигающим до 25-30%. Для снижения аберраций и повышения к.п.д. оптики могут быть рекомендованы линзы с одной асферической поверхностью. Но для еще большего снижения массы линзы одна из оптических поверхностей может быть выполнена киноформной. Эти линзы имеют фокусное расстояние 115 мм и 245 мм, а также соответственно относительное отверстие 1:1,25 и 1:1,4. Максимальный диаметр кружка рассеяния составляет для первой линзы 0,25 мм, для второй линзы – 0,17 мм, – 0,2 мм. При этом достигается минимальная масса при небольших аберрациях. Для первой линзы масса в стекле составляет 0,446 кг, а для второй линзы – 1,2 кг. Потери энергии излучения за счет аберраций не превышают 10%.

Для работы на различных дальностях целесообразно соответственно изменять и угол подсвета, который можно функционально связать с соответствующим изменением временной задержки в АИ ПНВ. Для этого может быть использован вместо линзы вариообъектив с плавно изменяемым фокусным расстоянием. Его фокусное расстояние изменяется в пределах от 60 мм до 240 мм при относительном отверстии 1:1,4. Угол подсвета соответственно изменяется от $6 \times 3^\circ$ до $1,5 \times 0,75^\circ$. Масса объектива в стекле составляет 3,2 кг, габариты $\varnothing 180 \times 354,5$ мм. Однако более эффективным и дешевым решением является создание комбинированного прожектора, состоящего из канала на базе ИЛПИ и 4-х каналов на основе мощных ИК светодиодов, например, У-224А-1.

Такой светодиод имеет мощность излучения в непрерывном режиме 250 мВт, рабочую длину волны 805 нм или 870 нм (по выбору), угол подсвета $5 \pm 1^\circ$, энергетическую силу света 8 Вт/Ср, напряжение питания 2,2 В при токе 0,7 А. Светодиоды располагаются по периметру объектива канала ИЛПИ – по 4-м углам прожектора. Прожектор может при включенном ИЛПИ работать с углом подсвета $1,5 \times 0,75^\circ$, а при включенных светодиодах - $5 \pm 1^\circ$. Диаметр светодиода составляет 20 мм, продольный габарит – 36 мм. Схема проста, компактна, светодиоды значительно дешевле, чем вариообъектив, их срок их службы превышает 5×10^4 часов.

Дальнейшим развитием схемы прожектора ПЛ-1 следует считать лазерные прожектора с возможностью слежения за оптической осью ПНВ по горизонту и по вертикали. Это достигается с помощью электромеханического привода. При этом может быть реализовано автоматическое удержание перемещающегося по фронту объекта наблюдения в пределах пятна подсвета за счет формирования вспомогательных пятен подсвета с частотами 3 Гц, 5 Гц, 7 Гц, 9 Гц, расположенных по периметру основного пятна. При этом на выходе ПНВ установлен фотоприемник, подключенный к компаратору, который через регистр управления связан с приводом перемещения оси прожектора по горизонту и вертикали. Пусть объект наблюдения сместился вправо от пятна подсвета, формируемого основным ИЛПИ и попал в пятно подсвета, формируемого вспомогательным ИЛПИ с частотой 5 Гц. Фотоприемник воспримет этот сигнал с экрана ЭОП и преобразует его в электрический сигнал, который поступит в компаратор. Он выработает разностной сигнал по отношению к частоте основного

ИЛПИ и будет через регистр управлять работой привода в направлении устранения сигнала с частотой 5 Гц, чтобы объект снова окажется в пределах основного пятна подсвета. Аналогичным образом осуществляется управление приводом при попадании объекта в другие вспомогательные пятна подсвета. Таким образом, привод осуществляет слежение за объектом наблюдения.

Перечень ключевых слов: лазер, осветитель, прибор ночного видения, мощность излучения, длина волны, угол подсвета.

А20 Лазерный телевизионный прибор для наблюдения

Белоконев В.М., Волков В.Г., Саликов В.Л., Случак Б.А.

ОАО «НПО «Альфа», Москва, Россия

Рассматривается лазерный телевизионный прибор - телевизионная система (ТВС) «Альфа-Призрак-М» для наблюдения окружающего пространства, обнаружения встречного оптического наблюдения, прицеливания и видеосъемки в любых погодных условиях (туман, дождь, снег), при отсутствии внешнего освещения, при световых помехах, большом уровне светового фона и других факторах, затрудняющих наблюдение. Прибор обеспечивает защиту от встречных засветок, разделение наблюдаемых объектов по дальности, вскрытие маскировки за счет разделения объектов по отраженному ИК контрасту, видение через тонированные и бликующие стекла, определение дальности до наблюдаемых объектов. Даны примеры характерных изображений, которые могут наблюдаться в такой прибор.

ТВС является ручным прибором, допускающим установку на штатив или поворотное устройство. Он может работать днем и ночью, в сложных метеоусловиях, при воздействии встречных световых помех, пыли и дыма. Угол поля зрения в пассивном режиме составляет $5,2 \times 3,7^\circ$, в активно-импульсном (АИ) режиме $4,0 \times 3,0^\circ$. ТВС имеет дальность распознавания при внешнем световом фоне не более 1000 лк ростовой фигуры человека – до 700 м, грузового автомобиля – дл 1100 м. При этом дальность до зоны подсвета составляет 20-2000 м, шаг по дальности до зоны подсвета 10, 20, 40, 100, 200, 400 м.

Дальность обнаружения оптических средств по отраженным от них бликам зондирующего лазерного излучения при метеорологической дальности видения 10 км и освещенности до $4 \cdot 10^4$ лк составляет при диаметре входного зрачка оптического средства 24 мм – до 1500 м, 100 мм – до 2500 м. Питание ТВС может осуществляться от встроенной или внешней аккумуляторной батареи с номинальным напряжением =12,6 - 16,8 В, от сети постоянного тока напряжением 10,5 - 30,0 В от гнезда прикуривателя через штатный бортовой адаптер (БА) с выходным напряжением =18 – 21 В, от сети переменного тока напряжением ~100 – 240 В частотой 50 – 60 Гц, через штатный сетевой адаптер (СА) к сети переменного тока с выходным напряжением 18 – 21 В. Потребляемая мощность АИ ТВС не превышает 10 Вт при времени непрерывной работы от аккумуляторной батареи до 2,5 часа, при питании от БА и СА – не менее 4 часов с перерывом не менее 15 мин. Габариты ТВС составляют 235x145x70 мм, масса - 1,8 кг.

По сравнению с другими известными АИ ТВС прибор «Альфа-Призрак-М» имеет ряд отличий. К ним относится встроенное электропитание, автоматическая подзарядка аккумуляторной батареи при питании прибора от внешнего источника, в том числе СА, прикуривателя автомобиля и солнечной батареи, возможность вывода изображения и управления прибором от ПЭВМ, повышенный уровень защищенности от внешних воздействий (брызго-пылезащищенный и ударопрочный корпус),

автоматическое управление мощностью излучения подсвета в зависимости от дальности наблюдения, оперативный подсчет наработки, возможность определения и передачи координат обнаруженного объекта, возможность установки на штатив. Энергия лазерного излучения может регулироваться дискретно относительно максимального значения в соотношениях: макс; $\frac{1}{2}$ макс, $\frac{1}{4}$ макс, $\frac{1}{8}$ макс, $\frac{1}{16}$ макс. ТВС выдает ТВ сигнал в стандарте CCIR на внешние устройства воспроизведения и записи.

Дистанционное управление режимами работы ТВС осуществляется от ПЭВМ по двухпроводному интерфейсу RS-485. Текущая наработка ТВС в часах отображается в информационной строке на экране видеискателя каждый раз при включении ТВС. Она обеспечивает аварийное отключение лазерного осветителя с отображением в информационной строке на экране видеискателя пиктографического символа отключения. ТВС работает в диапазоне предельных рабочих температур (-20) - (+50)°С, при относительной влажности не более 90% при температуре +30°С.

Возможна установка GPS, что позволяет определить координаты положения комплекса. Возможна также установка магнитного цифрового комплекса. Это позволяет определить направление на цель. Дальность до цели, измеренная в АИ режиме в сочетании с известным направлением на нее, позволяет определить координаты цели и обеспечить точное целеуказание. Наличие ПЭВМ позволяет автоматизировать процесс поиска цели, а при ее обнаружении – точную фиксацию ее положения практически при любых внешних условиях, обеспечить документирование, архивирование, цифровую обработку и дистанционную передачу визуальной и цифровой информации, контролировать работу всех блоков ТВС, дистанционно управлять ею и оптимизировать режимы ее функционирования. Наличие соответствующего адаптера позволяет подключить ТВС к солнечной батарее. ТВС может быть с успехом использована для проведения антитеррористических операций как при наблюдении со штатива, так и при базировании на мобильных носителях (автомшины, катера, вертолеты, БПЛА и пр.).

Перечень ключевых слов: лазер, телевизионный прибор, дальность распознавания и обнаружения, угол поля зрения, зона подсвета.

A21 Влияние параметров приповерхностных варизонных слоев на емкостные и фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе гетероэпитаксиального КРТ МЛЭ

Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядх С.М.

Сибирский физико-технический институт ТГУ, Томск, Россия

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (КРТ) позволяет выращивать гетероэпитаксиальные структуры с заданным распределением состава по толщине пленки, что предоставляет новые возможности для оптимизации характеристик инфракрасных детекторов. Приповерхностные варизонные слои с повышенным составом CdTe уменьшают влияние поверхностной рекомбинации на время жизни носителей заряда в объеме эпитаксиальной пленки. Исследования электрических характеристик МДП-структур на основе варизонного МЛЭ КРТ необходимы для оценки качества пассивирующих покрытий, а также для разработки матриц монолитных инфракрасных детекторов. Однако емкостные и фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе гетероэпитаксиального МЛЭ КРТ с варизонными слоями до сих пор практически не исследованы.

В этой работе представлены результаты исследований влияния параметров варизонных слоев с повышенным составом CdTe на емкостные и фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе МЛЭ КРТ. Теоретически и экспериментально исследовано влияние состава на поверхности и толщины варизонного слоя на характеристики МДП-структур на основе $(n)p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ при $x=0,21\text{-}0,23$. Например, на рисунке 1 показано распределение состава CdTe в приповерхностном слое для двух образцов с составами на поверхности 0,45 (кривая 1) и 0,70 (кривая 2) с толщинами варизонного слоя 0,5-0,7 мкм. На рисунке 2 показаны вольт-фарадные характеристики (ВФХ) для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ с приповерхностными варизонными слоями при различных составах на поверхности.

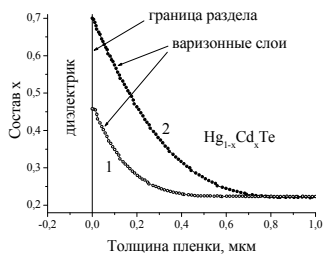


Рисунок 1. Распределения состава в приповерхностном слое для МДП-структур на основе $n\text{-HgCdTe}$ с разными составами на поверхности (1 - 0,45, 2 – 0,70)

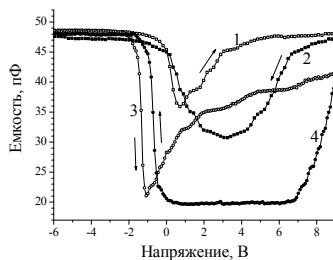


Рисунок 2 – ВФХ МДП-структур на основе $n\text{-HgCdTe}$ с варизонными слоями при составе на поверхности 0,45(1,2) и 0,70(3,4) при прямой (1,3) и обратной (2,4) развертке напряжения, измеренные на частоте 2 кГц.

Из рисунка 2 следует, что увеличение состава на поверхности приводит к увеличению глубины и ширины провала низкочастотной ВФХ. Это связано с изменением условий генерации неосновных носителей в приповерхностном слое КРТ при уменьшении собственной концентрации в широкозонном варизонном слое. Анализ фотоэлектрических характеристик МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ при $x=0,21\text{-}0,23$ показал, что наличие варизонных слоев ведет к подавлению туннельной рекомбинации через глубокие уровни в режиме сильной инверсии.

Также исследовано влияние толщины варизонного слоя и состава на поверхности на ВФХ МДП-структур на основе МЛЭ $p\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$. Измерялись емкостные и фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе $p\text{-HgCdTe}$ с составом на поверхности 0,34, 0,49, 0,58 при толщине варизонного слоя 1,5-1,7 мкм. На рисунке 3 показаны распределения состава CdTe в приповерхностном слое для трех образцов с различными составами. На рисунке 4 приведены ВФХ для МДП-структур на основе $p\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ с приповерхностными варизонными слоями при различных составах на поверхности. Из результатов емкостных и фотоэлектрических измерений следует, что увеличение состава у поверхности и толщины слоя приводит к увеличению дифференциального сопротивления области пространственного заряда (ОПЗ) и уменьшению скорости межзонной туннельной рекомбинации в режиме сильной инверсии.

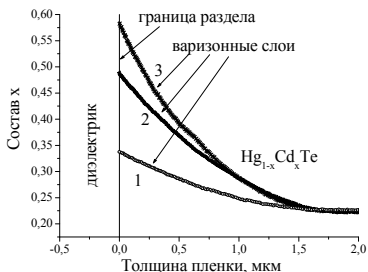


Рисунок 3. Распределения состава в приповерхностном слое для МДП-структур на основе $p\text{-HgCdTe}$ с разными составами на поверхности (1 - 0.34, 2 - 0.49, 3 - 0.58)

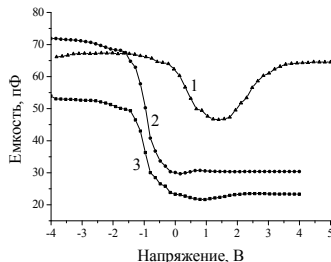


Рисунок 4. ВФХ МДП-структур на основе $p\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ с различными параметрами варизонного слоя, измеренные при прямой развертке напряжения на частоте 10 кГц при составе на поверхности 0.34 – кривая 1, 0.49 – кривая 2, 0.58 – кривая 3

Для различных параметров варизонных слоев рассчитаны емкостные характеристики, величина дифференциального сопротивления ОПЗ в сильной инверсии. В результате расчетов подтверждено, что создание приповерхностных варизонных слоев с повышенным составом CdTe приводит к подавлению туннельной рекомбинации через глубокие уровни для $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ при $x=0,21\text{-}0,23$. Также показано, что создание варизонных слоев приводит к снижению вклада процессов генерации-рекомбинации Шокли-Рида через глубокие уровни при определенной ширине варизонного слоя и достаточно высокой концентрации электронов (например, по данным расчета при толщине варизонного слоя 0,1 мкм при концентрации электронов $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$). Но в случае тонких варизонных слоев или низкой концентрации электронов генерационный поток, связанный с процессами Шокли-Рида, может уменьшиться при создании варизонных слоев не так значительно, поскольку ширина ОПЗ для структур с варизонными слоями превышает ширину варизонного слоя и оптимальные условия для генерации-рекомбинации Шокли-Рида возникают на некотором расстоянии от границы раздела полупроводник-диэлектрик. Таким образом, показано, что наличие варизонных слоев может приводить к существенным изменениям электрофизических и фотоэлектрических характеристик МДП-структур на основе $(n)p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ при $x=0,21\text{-}0,23$, а создание варизонных слоев с заданными параметрами может использоваться для управления характеристиками МДП-структур на основе МЛЭ КРТ.

A22 Фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе гетероэпитаксиального варизонного КРТ МЛЭ

Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М.

Сибирский физико-технический институт ТГУ, Томск, Россия

Фотоэлектрические измерения могут дать полезную информацию о физических процессах в МДП-структурах, исследовать закономерности изменения дифференциального сопротивления области пространственного заряда (ОПЗ) в различных условиях. Следует отметить, что сопротивление объема эпитаксиальной

пленки не влияет на результаты фотоэлектрических измерений. При применении метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (КРТ) можно управлять распределением состава по толщине эпитаксиальных пленок, что используется для оптимизации характеристик инфракрасных детекторов. Исследования фотоэлектрических характеристик МДП-структур на основе варизонного МЛЭ КРТ необходимы для построения модели физических процессов в МДП-структурах на основе варизонного КРТ, что может оказаться полезным для разработки матриц монокристаллических инфракрасных детекторов. Однако данных о фотоэлектрических характеристиках МДП-структур на основе гетероэпитаксиального МЛЭ КРТ пока немного.

В этой работе представлены результаты исследований фотоэлектрических характеристик МДП-структур на основе КРТ МЛЭ, в том числе с приповерхностными варизонными слоями с повышенным составом CdTe . Теоретически и экспериментально исследованы зависимости фотоэдс от напряжения для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ при $x=0.21-0.23$. Показано, что дифференциальное сопротивление ОПЗ для этих МДП-структур без варизонного слоя ограничено туннелированием через глубокие уровни (рисунок 1).

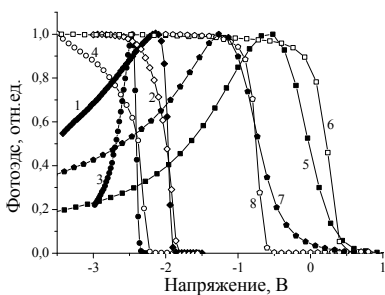


Рисунок 1 – Зависимости фотоздс от напряжения для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{0.77}\text{Cd}_{0.23}\text{Te}/\text{АОП}$ (1-4) и $n\text{-Hg}_{0.77}\text{Cd}_{0.23}\text{Te}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ (5-8) в случаях отсутствия варизонного слоя (1,3,5,7) и наличия варизонного слоя (2,4,6,8) при концентрации электронов $1,8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (1,2), $3,7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (3,4), $1,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (5,6), $4,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (7,8)

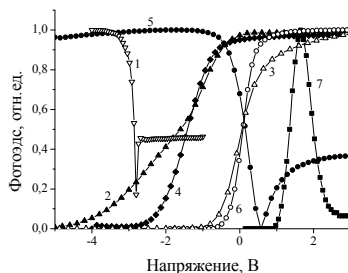


Рисунок 2. Зависимости фотоздс от напряжения для МДП-структур на основе $p\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}/\text{АОП}$ (1) и $p\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ (2-7) в случаях отсутствия варизонного слоя (2,4,5,7) и наличия варизонного слоя (1,3,6) при концентрациях дырок $7,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (1), $8,4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (2,3), $8,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (4), $1,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (5,6), $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (7)

Для МДП-структур на основе $p\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ дифференциальное сопротивление ОПЗ при высоких концентрациях дырок ($3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, рисунок 2, кривая 7) ограничено межзонным туннелированием, а при меньших концентрациях зависимость фотоздс от напряжения близка к классической (кривые 2,4,3,6), хотя возможно наличие большой компоненты фотоздс в обогащении, связанной, по-видимому, с неоднородностями пленки (кривые 1,5).

Также исследованы зависимости фотоздс МДП-структур на основе КРТ МЛЭ от частоты модуляции светового потока (рисунок 3) и температуры (рисунок 4). Показано, что создание варизонного слоя с повышенным составом CdTe приводит к увеличению времени жизни неравновесных носителей в ОПЗ МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

при $x=0,21-0,23$ в 2-4 раза (кривые 1 и 2 рисунка 3). На рисунке 4 символами показаны экспериментальные зависимости фотоэдс от температуры для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{0,77}\text{Cd}_{0,23}\text{Te}$ при концентрации электронов $9,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при наличии приповерхностного варизонного слоя и при отсутствии варизонного слоя для различных напряжений смещения. Из рисунка видно, что для МДП-структур на основе КРТ без варизонного слоя наблюдается значительный рост фотоэдс в сильной инверсии при нагреве от 77 К до 120 К.

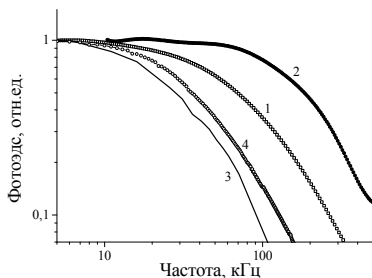


Рисунок 3 – Зависимости фотоэдс от частоты модуляции светового потока в режиме сильной инверсии для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ (1,2), $n\text{-Hg}_{0,69}\text{Cd}_{0,31}\text{Te}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ (3) и $p\text{-Hg}_{0,62}\text{Cd}_{0,38}\text{Te}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ (4) в случаях отсутствия варизонного слоя (2,3) и наличия варизонного слоя (1,4)

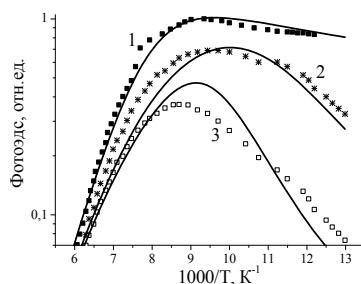


Рисунок 4 – Экспериментальные зависимости фотоэдс (символы) от обратной температуры для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{0,77}\text{Cd}_{0,23}\text{Te}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ в случаях наличия варизонного слоя в сильной инверсии (1) и отсутствия варизонного слоя в максимуме зависимости фотоэдс от напряжения (2), в сильной инверсии (3). Линиями показаны результаты расчета

Для различных параметров варизонных слоев рассчитаны значения фотоэдс и дифференциального сопротивления ОПЗ МДП-структур на основе $n(p)\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ при $x=0,21-0,23$ в инверсии при разных потенциалах и температурах. На рисунке 4 показаны расчетные температурные зависимости фотоэдс для МДП-структур на основе МЛЭ КРТ с варизонным слоем и без варизонного слоя. Расчетные кривые качественно согласуются с экспериментальными данными. При расчете учитывались генерационные потоки за счет диффузии неосновных носителей из квазинейтрального объема, туннельной генерации через глубокие уровни, генерации Шокли-Рида в ОПЗ, межзонной туннельной генерации, генерации от постоянной засветки светодиодом. Показано, что вид температурной зависимости фотоэдс МДП-структур на основе КРТ без варизонного слоя типичен для доминирования при 77 К туннельной генерации через глубокие уровни. Для лучшего согласования расчетных и экспериментальных данных необходим учет температурных зависимостей подвижности и времени жизни носителей заряда в реальной структуре. Таким образом, исследования фотоэлектрических характеристик МДП-структур на основе КРТ МЛЭ позволяют получить важную информацию о физических процессах в МДП-структурах.

A23 Прецизионная лазерная резка в технологии ТГц-ИК конвертера

^{1,2} Паулиш А.Г., ^{2,3} Лоншаков Е.А.

¹ Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Россия

³ Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

В работе [1] предложена схема визуализации терагерцового (ТГц) излучения с помощью конвертера ТГц излучения в ИК излучение с последующей регистрацией ИК камерой. Конвертор представляет собой многослойную структуру на основе тонкой свободновисящей металлизированной с двух сторон диэлектрической плёнки. С одной стороны плёнки выполнен металлизированный топологический рисунок, обеспечивающий резонансное поглощение излучения на заданной частоте, а с противоположной стороны нанесён эмиссионный слой с коэффициентом черноты близким к единице. В современной литературе такой поглотитель определяется как метаматериал [2], так как толщина диэлектрической плёнки и размер топологического рисунка много меньше рабочей длины волны. Резонансное поглощение ТГц излучения приводит к нагреву структуры конвертера и, тем самым, к увеличению ИК излучения со стороны эмиссионного слоя, которое регистрируется высокочувствительной ИК камерой.

Недостатком такой конструкции является тот факт, что латеральная теплопроводность вдоль структуры поглотителя приводит к расплыванию изображения, аналогично блюмингу в ПЗС-матрицах, с той разницей, что в ПЗС-матрицах это связано с перетеканием заряда между пикселями, а здесь – перетекание тепла. Данный эффект, кроме расплывания изображения, снижает также чувствительность детектора.

В настоящей работе предложен способ уменьшения нежелательного влияния блюминга, который заключается в том, что в структуре конвертера методом прецизионной лазерной резки изготавливаются сквозные разрезы в виде штрихов в двух ортогональных направлениях, не нарушающие целостности структуры. В работе решалась задача выбора оптимальной оптической схемы лазерной установки и методики резки многослойной структуры, состоящей из материалов с сильно отличающимися оптическими и теплофизическими характеристиками – полимер, графит и металл. Подобранные режимы позволили обеспечить резку структуры в режиме абляции, что существенно снизило ширину, как самого разреза, так и ширину нарушенной области вокруг разреза менее расстояния между пикселями. На рисунке 1 слева показан фрагмент структуры многоспектрального конвертера без разрезов, состоящего из пикселей с различной спектральной и поляризационной структурой. На рисунке 1 справа показано тепловое изображение конвертера со стороны эмиссионного слоя, полученного с помощью болометрической камеры с температурным разрешением 100 мК. Конвертер засвечен ТГц излучением, содержащим частоты в диапазоне 0,3-0,4 ТГц с двумя взаимно перпендикулярными поляризациями. Для удобства восприятия пиксели с различной спектральной и поляризационной чувствительностью раскрашены в различные цвета. На рисунке 2 слева показан фрагмент структуры многоспектрального конвертера со сквозными разрезами. На рисунке 2 справа показано его тепловое изображение. Из рисунка видно, что расплывание изображения существенно меньше, а величина сигнала больше, чем на рисунке 1.

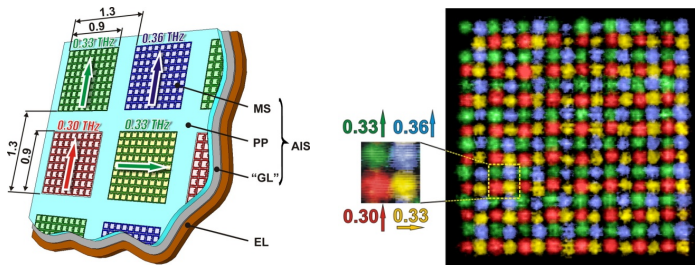


Рисунок 1. Схема многоспектрального конвертера (слева) и его тепловое изображение (права) при засветке конвертера ТГц излучением, содержащим частоты в диапазоне 0.3-0.4 ТГц с двумя взаимно перпендикулярными поляризациями. Пиксели с различной спектральной и поляризационной чувствительностью раскрашены в различные цвета. MS – метаповерхность, PP – полипропилен, GL – металлизированный слой, AIS – метаматериал, EL – эмиссионный слой.

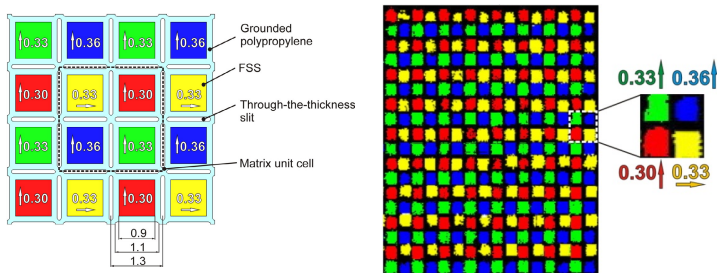


Рисунок 2. Схема многоспектрального конвертера с разрезами (слева) и его тепловое изображение (права), остальное как на рисунке 1.

Литература:

[1] А.Г. Паулиш и др. Конвертер терагерцового излучения в инфракрасное излучение на основе метаматериалов для детекторов терагерцового диапазона. Материалы данной конференции.

[2] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla. Perfect metamaterial absorber, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 207402 (4 pages), 2008.

A24 Сравнительный анализ параметров детекторов терагерцового излучения на основе ТГц-ИК конвертера и матрицы ячеек Голея

Паулиш А.Г.

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», Новосибирск, Россия

В Филиале ИФП СО РАН ведётся разработка болометрических неохлаждаемых приёмников терагерцового (ТГц) диапазона на основе ультратонких резонансных поглотителей. Поглотитель представляет собой диэлектрическую плёнку, на одной поверхности которой создан металлизированный микрорисунок, а противоположная поверхность покрыта сплошным металлическим слоем [1]. Топология микрорисунка рассчитывается таким образом, чтобы при заданных толщинах слоёв обеспечить близкое к единице поглощение излучения на заданной частоте. Такие поглотители в

современной литературе называются метаматериалами, так как толщина поглотителя и характерный размер микрорисунок много меньше длины волны падающего излучения.

В настоящей работе рассматриваются два варианта схемотехнических решений для построения детектора ТГц детектора с пространственным и спектральным разрешением на основе ультратонких поглотителей и оптической системы считывания.

Первый вариант основан на конвертере ТГц излучения в инфракрасное (ИК) [1]. Поглощение ТГц излучения приводит к нагреву конвертера и увеличению интенсивности ИК излучения со стороны эмиссионного слоя, которое регистрируется традиционной ИК камерой. Пространственное распределение интенсивности ТГц излучения отражается в распределении интенсивности теплового излучения. В данной конструкции чувствительность ТГц детектора в основном определяется толщиной конвертера и чувствительностью ИК камеры, а быстродействие – латеральной теплопроводностью вдоль структуры конвертера.

Второй вариант детектора основан на матричной структуре микроячеек Голя [2], где поглощение ТГц излучения происходит в замкнутом газовом объёме, ограниченном с одной стороны гибкой мембраной с зеркальным покрытием. Газ в результате поглощения ТГц излучения нагревается и, расширяясь, деформирует мембрану, что приводит к отклонению отраженного от мембраны видимого луча, которое регистрируется с помощью КМОП матрицы. В данной конструкции чувствительность детектора определяется жесткостью мембраны и чувствительностью оптической системы считывания к перемещению мембраны.

В работе построена аналитическая теплофизическая модель для каждого из типов приёмника и рассчитаны основные параметры детектора: чувствительность и быстродействие. На рисунках 1 и 2 приведены геометрические схемы элемента (пикселя) для каждого из типов детектора. Для каждой конструкции решалось уравнение теплового баланса, и определялась минимальная энергия ТГц излучения ($\Phi_{\text{мин}}$), которая могла быть зарегистрирована, в зависимости от геометрических параметров: толщины слоёв поглотителя, размера пикселя. Время срабатывания детектора определялось как отношение его теплоёмкости с теплопроводности.

Расчеты показали, что микроячейка Голя позволяет получить большую чувствительность и хорошее быстродействие, однако такая матрица более сложна в изготовлении, чем конвертер. Тем не менее, если учесть, что для ТГц детектора на матрице ячеек Голя требуется недорогая КМОП камера, а не дорогостоящая ИК камера, как для конвертера, то стоимость детектора на ячейках Голя в итоге будет ниже, чем для конвертера.

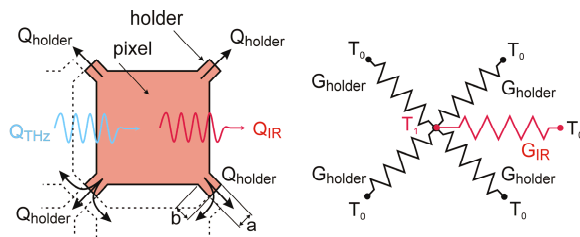


Рис.1. Схема пикселя конвертера (слева) и его эквивалентная теплофизическая модель (справа).

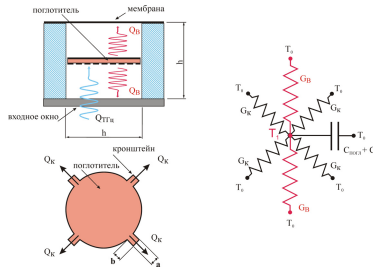


Рис.2. Схема микроячейки Голея (слева), вид сверху на поглотитель (слева внизу), эквивалентная тепловая схема ячейки (справа).

Литература:

[1] Paulish A.G., Fedorinin V.N., Kuznetsov S.A., Gelfand A.V., Lazorskiy P.A. Bolometric THz-to-IR converter for terahertz imaging. Appl. Phys. Lett., 2011, Vol.99, Issue 2, 023501(3 p).

[2] Paulish A.G., Fedorinin V.N. Optical readout system for membrane deformation measurements in matrix optoacoustic infrared imager. Measurement Science and Technology Vol. 21, N5, 054015, 5pp, 2010.

A25 Оптические элементы для визуализатора терагерцового излучения с использованием ТГц-ИК конвертера на основе метаматериалов

Паулиш А.Г., Хрящев С.В.

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», Новосибирск, Россия

В работе [1] предложена схема визуализации терагерцового излучения на основе конвертера терагерцового (ТГц) излучения в инфракрасное (ИК) излучение. ТГц-ИК конвертер представляет собой многослойную структуру состоящей из ультратонкого резонансного поглотителя на основе метаматериала и эмиссионного слоя с коэффициентом черноты в ИК-диапазоне близким к единице. Поглощение ТГц-излучения приводит к нагреву поглотителя и увеличению ИК-излучения со стороны эмиссионного слоя. Регистрация ИК-излучения осуществляется высокочувствительной ИК камерой.

Для реализации единого прибора–визуализатора необходимо разработать соответствующие оптические элементы, такие как ТГц объектив для проецирования изображения объекта на поверхность ТГц-ИК конвертера, а так же проекционный объектив для передачи изображения с обратной поверхности конвертера в плоскость матрицы ИК камеры. Схема визуализации показана на рис. 1.

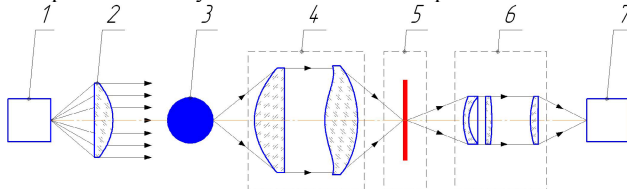


Рис. 1. Схема визуализации

1 – ТГц источник; 2 – коллиматор; 3 – объект наблюдения; 4 – ТГц-объектив; 5 – ТГц-ИК конвертер; 6 – ИК-объектив; 7 – ИК охлаждаемая камера

В настоящей работе решалась задача разработки оптических элементов для получения изображения в ТГц-диапазоне близко расположенных объектов: расстояние от передней поверхности ТГц-объектива до объекта 100 мм, поле зрения 50 мм. В качестве материалов для изготовления линз ТГц-объектива рассматривались полиэтилен высокой плотности (HDPE), полиметилпентен (TPX) и фторопласт (PTFE). Анализ спектральных характеристик этих материалов в диапазоне 0,1-1,5 ТГц показал, что эти материалы обладают примерно одинаковым коэффициентом поглощения. Поэтому для изготовления линз объектива был выбран фторопласт, как наиболее доступный больших размеров. Так как на сегодня отсутствуют технологии просветляющих покрытий для фторопласта, необходимо было свести количество линз к минимуму, то есть к двум. При таких условиях качественное изображение на поверхности конвертера можно получить, используя только асферическую форму линз. Оптическая схема ТГц-объектива показана на рис. 2.

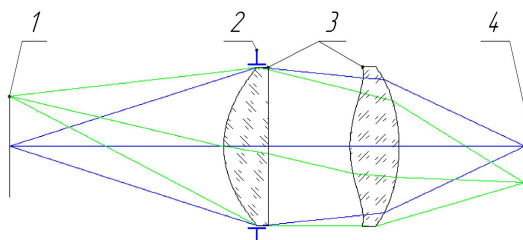


Рис. 2. Оптическая схема ТГц-объектива

- 1 – плоскость объектов наблюдения; 2 – входной зрачок; 3 – асферические линзы;
4 – плоскость метаматериала конвертера

Использование асферических поверхностей линз, которые описываются полиномом вида $Z(r) = \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6$, позволяет получить изображение дифракционного качества по всему полю изображения. Дисперсия показателя преломления фторопласта в ТГц-диапазоне составляет малую величину, благодаря чему объектив является ахроматизированным для всего участка спектра.

Для разработки проекционного ИК-объектива необходимо было решать нетрадиционную задачу передачи изображения. Обычно тепловизионные системы разрабатываются для наблюдения удалённых объектов. Здесь же задачей является передача теплового изображения конвертера на поверхность ИК матрицы, разнесённых друг от друга на как можно меньшее расстояние для снижения весогабаритных параметров детектора и повышения коэффициента передачи энергии. Для проведения расчётов в качестве инфракрасной камеры была выбрана охлаждаемая камера Sofradir Epsilon MW с матрицей на основе соединения кадмий-ртуть-теллур с диагональю 7,2 мм и диапазоном спектральной чувствительности 3,6-4,9 мкм. Диаметр охлаждаемой диафрагмы 3,4 мм. Оптическая схема ИК-объектива показана на рис. 3.

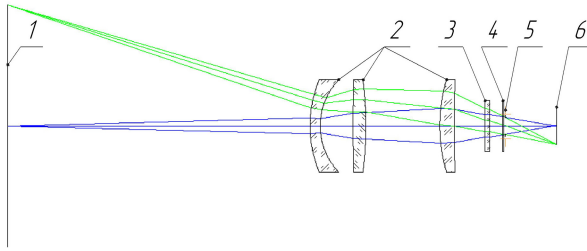


Рис.3. Оптическая схема проекционного ИК-объектива
 1 – плоскость эмиссионного слоя конвертера; 2 – оптические компоненты;
 3 – окно криостата; 4 – холодный фильтр; 5 – охлаждаемая диафрагма;
 6 – плоскость фотоприёмника

Оптическая система содержит три линзовых компонента в виде менисков со сферическими поверхностями, первый из которых изготовлен из германия, а два остальных из кремния. Данная комбинация материалов обеспечивает ахроматизацию объектива в диапазоне 3,6–4,9 мкм и коррекцию остальных aberrаций, обеспечивая качество изображения близкое к дифракционному, а так же минимальное количество линз. Расчёт схемы произведён с учётом расположения выходного зрачка в плоскости охлаждаемой диафрагмы криостата, что позволяет полностью исключить фоновое излучение от элементов конструкции объектива.

[1] Paulish A.G., Fedorinin V.N., Kuznetsov S.A., Gelfand A.V., Lazorskiy P.A. Bolometric THz-to-IR converter for terahertz imaging. Appl. Phys. Lett., 2011, Vol.99, Issue 2, 023501(3 p).

А26 Проект матричного мультиплексора для ИК ФПУ формата 320×256 с эффективной зарядовой емкостью ячейки более 10 гигаэлектрон

¹Бородин Д.В., ¹Осипов Ю.В., ²Васильев В.В.

¹ ФГУП «НПП «Пульсар», Москва, Россия

² ООО «РТК Интекс», Москва, Россия

Матричные мультиплексоры с интегрированием в ячейке для гибридных ИК ФПУ освоенных в России форматов 128x128 - 640x512 [1-3] имеют физическую зарядовую емкость в каждой ячейке ~10 мегаэлектрон. Физическое увеличение этой емкости проблематично из-за технологических ограничений. В тоже время очевидна актуальность создания матричных устройств считывания с большой зарядовой емкостью в ячейке для длинноволновых ИК ФПУ. Это позволило бы перейти от строчного накопления сигнала к кадровому, то есть в ~300 раз увеличить время интегрирования и более чем на порядок уменьшить NEDT.

Значительное увеличение эффективной емкости возможно в схемах, использующих принцип периодической компенсации накапливаемого заряда небольшими порциями известной величины с подсчетом количества таких актов компенсации. Недавно совместными усилиями фирм "CEA Leti-MINATEC" и "SOFRADIR" (Франция) было создано ФПУ на основе КРТ фотодиодов со схемой

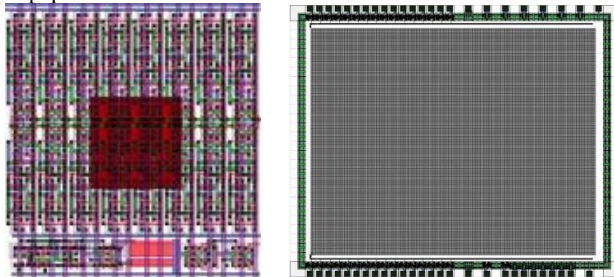
считывания на подобном принципе, которое позволило достичь температурного разрешения в 2 мК [4,5].

Представленный инициативный проект выполнен на основе оригинальных схемных решений [6, 7] опробованных ранее. Принципиальным явилось то, что постоянная порция компенсационного заряда формируется в ячейке в любой момент времени, а не в строго определенные моменты (например, достижения сигнала уровня срабатывания компаратора) поскольку ее величина не определяется разностью напряжений на емкости интегрирования в ячейке в момент срабатывания схемы компенсации и потенциала сброса. Тем самым значительно упрощаются требования по задержке срабатывания к одному из ключевых элементов схемы ячейки - компаратору.

Схема является синхронной и, тем самым, не требуется постоянного нахождения компаратора во взведенном состоянии. Рассеиваемая мощность уменьшается. В схеме для формирования порции заряда не требуется дополнительного внешнего напряжения (напряжения сброса), что уменьшает собственный шум схемы, а время протекания этого заряда минимально, поскольку проводится через ключевые транзисторы.

Схема разработана по КМОП технологии с проектными нормами 0,18 мкм, один поликремний, пять металлов, принятым в новом кристалльном производстве ОАО «НИИМЭ и завод Микрон». Ячейка содержит все элементы схемы, в том числе 16-ти разрядный двоичный счетчик количества импульсов компенсации, цифровые буферы вывода информации на периферию кристалла. Ячейка не содержит элементов памяти. Основным режимом функционирования является "мгновенная фотография" со считыванием после интегрирования. Размеры ячеек 30x30 мкм, кристалла 12x10 мм.

Заложенная в ячейке величина порции компенсации в 150000 электронов и разрядность счетчика (64000) дают в итоге максимальную эффективную зарядовую емкость ячейки 10 Ге-. Основные прибавки к шуму обусловлены шумом квантования и шумом схемы формирования кванта заряда с компаратором (по 20% по мощности к фоновому шуму). На рисунках представлены разработанные топологии ячейки и всего мультиплексора формата 320x256 ячеек.



1.Бородин Д.В., Осипов Ю.В., Васильев В.В., Смотаев Б.А. Аналоговые фокальные КМОП процессоры для гибридных линейчатых, субматричных и матричных ИК фотоприемных устройств. – XXI МНТК по фотоэлектронике и приборам ночного видения.// Москва - 2010 г. – С.107-109.

2.В.П. Рева, И.В. Марчишин, С.В. Коринец, Ф.Ф. Сизов. Особенности проектирования и изготовления схем считывания для ИК матриц большого формата. Тезисы докладов конференции "Фотоника-2011", Новосибирск, с. 67.

3.Д.В.Бородин, Ю.В.Осипов, В.В.Васильев. Матричный КМОП мультиплексор формата 640x512 ячеек для гибридных фотоприемных устройств. Научно-технический сборник "Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы", 2011г, №1(226), с.45-50.

4.P.Fillon, S.Dugalleix, F.Pistone, P.Tribolet. "Digital output for high performance MCT staring arrays."// Proc. of SPIE, 2006, v. 6206, p. OUI – OUF.

5.S.Bisotto, E. de Borniol, L.Mollard, F.Guellec, A. Peizerat, M. Tchagaspanian, P.Castelein, P. Maillart "A 25mkm pitch LWIR staring focal plane array with pixel-level 15-bit ADC ROIC achieving 2 mK NETD." // Proc. of SPIE, 2010, v. 7834, p. 7834OJ-1 - 7834OJ-11.

6.Д.В.Бородин, Ю.В.Осипов. Устройство считывания сигналов с многоэлементных фотоприемников (варианты)// Патент РФ №2361321, 21.12.2007

7.Д.В.Бородин, Ю.В.Осипов, В.В.Васильев. Вариант ячейки с элементами АЦП для матричного фотоприемного устройства. XXI МНТК по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 2010 г., Москва, Россия, с.141-143.

A27 Современное состояние производства CdTe, ZnTe, Cd_{1-x}Zn_xTe и приборов на их основе

Кульчицкий Н.А., Мельников А.А., Бунегина С.Л., Крапухин Д.В., Побойкина Н.В.

МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

В работе обсуждается современное состояние мировых рынков CdTe, ZnTe и CdZnTe, получивших бурное развитие в последние годы, дан анализ тенденций их развития. Рассмотрены особенности технологии роста кристаллов халькогенидов цинка и кадмия и их твердых растворов; проведен анализ характеристик получаемых материалов, приборов на их основе, а также основных производителей. Основными рынками сбыта материалов являются рентгеновские и гамма-детекторы излучения, солнечная энергетика, инфракрасные детекторы, технологии терагерцового диапазона [1,2].

Кристаллы твердых растворов CdZnTe являются наиболее перспективным материалом для неохлаждаемых полупроводниковых рентгеновских детекторов и гамма-излучения. Это объясняется гибкой вариативностью свойств, которая характеризует Cd_{1-x}Zn_xTe (x=0,04-0,1). Одним из главных преимуществ детекторных элементов на CdZnTe является возможность функционирования при комнатной температуре, в то время как для детекторов на основе германия требуется охлаждение жидким азотом. Наилучшее энергетическое разрешение детекторов, например, производства компании eV Products, составляет 0,5% на линии 60 кэВ. Также к преимуществам теллурида цинка кадмия по сравнению с CdTe относится более высокое удельное сопротивление. Это позволяет увеличить напряженность поля и снизить время сбора заряда или уменьшить темновой ток, который является основным источником электронного шума и отвечает за снижение энергетического разрешения прибора. Детекторы на основе теллуридов кадмия- цинка работают при комнатной температуре и могут обрабатывать более 2·10⁶ фотонов в секунду на мм². Уникальная комбинация спектроскопии и очень высокой скорости счета при комнатной температуре делает CdZnTe идеальным материалом для детектора ядерных излучений. Глобальный объем рынка CdZnTe кристаллов для детекторов излучения составляет около 100 млн. долларов США. Основными потребителями детекторных систем являются: медицинское оборудование (рентгеновские аппараты и томографы); системы безопасности (портовые, авиационные и железнодорожные терминалы, системы контроля доступа на охраняемые объекты); мобильные досмотровые системы; системы неразрушающего контроля (строительство, машиностроение и т. д.).

По своим характеристикам CdTe является перспективным материалом для производства ФЭП. Развитие технологий, позволяющих выращивать пленки со

скоростью более 1 мкм/мин, способствует росту производства ФЭП на основе CdTe. Сегодня в мире производится порядка 720 МВт/год солнечных батарей на теллуриде кадмия, что в 14 раз больше выпуска в 2003 г. – 25 МВт. Предполагается, что в 2012 году рынок солнечных батарей на основе CdTe составит 1,5 ГВт, что составит 6% общего рынка. Компания First Solar (США) развернула к началу 2010 г. производственные мощности свыше 1 ГВт/год.

На сегодняшний день рынок поликристаллической крошки из теллурида кадмия для распыления в процессе производства ФЭП на основе CdTe составляет чуть больше 45 млн.\$ США.

ИК-детекторы покрывают широкий круг применений, которые относятся к оборонному сектору, промышленному и коммерческому секторам и используются в устройствах ночного видения и тепловидения. Спрос со стороны оборонного сектора составляет порядка 70% от общего спроса на данные устройства. В настоящий момент наблюдается значительное увеличение спроса на приборы среднего и дальнего ИК-диапазонов. Объем рынка монокристаллов теллуридов кадмия-цинка для производства детекторов на основе CdHgTe составляет около 190 млн.\$ США в год в денежном выражении и порядка тонны монокристаллических образцов в год – в натуральном выражении. Средняя цена подложечного материала составляет ~100 \$/см² для подложек площадью около 10 см². Стоимость 1 см² крупных подложек может быть в несколько раз больше. Рост средней стоимости монокристаллических подложек обусловлен увеличением спроса на рынке детекторов на матричные широкоформатные элементы, требующие соответствующих подложек. Наибольший прирост ожидается в сегменте тепловидения для применений в пожарных службах, в секторах машиностроения и автомобилестроения.

Освоение THz-технологий только начинается и в течение ближайших 10-15 лет ожидается значительный рост. Применение THz-устройств может значительно возрасти за счет рынков телекоммуникации, медицины, микроскопии, оборонного сектора и обеспечения безопасности объектов. В число кристаллических материалов, используемых в THz-устройствах, входит ZnTe. Одним из наиболее крупных рынков, на который может выйти оборудование THz-диапазона, является рынок телекоммуникаций. Рынок THz-изображения оценивается в 20 млрд.\$ США.

Терагерцовые устройства контроля, мониторинга и диагностики имеют преимущества над аналогичными приборами, работающими в инфракрасном, радиоволновом, и ультразвуковом диапазоне. Замена рентгеновского оборудования на безвредную терагерцовую технику значительно повысит эффективность и качество проводимых исследований. Терагерцовое излучение может найти применение, где необходим непрерывный мониторинг живых объектов, например, при томографических исследованиях, в постоянно работающих системах безопасности объектов.

Лимитирующим фактором для развития рассмотренных областей в посткризисный период станет производство теллура (кадмий является несколько более доступным материалом), поэтому существует опасность роста цен на теллур. Данные опасения основаны на опыте прошлых лет, когда за период с 2003 г. по 2008 г., цена за кг теллура выросла с 20 \$ США до 260 \$ США. Также следует помнить, что сегодня рынок теллура является одним из самых маленьких промышленных рынков металлов – до 600 тонн/год. Например, производители ФЭП на основе CdTe будут крайне нуждаться в теллуре уже после того, как объем этого рынка вырастет свыше 3-4 ГВт/год (а это очень немного для амбициозных задач солнечной энергетики). Для производства такого количества потребуется 300-400 тонн теллура/год, т.е. более половины всего добываемого сейчас теллура. Замедление вследствие кризиса темпов роста рудной базы для извлечения теллура с одной стороны и рост потребности в

теллуре с другой, могут вызвать рост цен на теллур и, в конечном счете, отразится на стоимости соединений и приборов.

Литература

1. N.A. Kulchitskiy, A.V. Naumov. Russian Journal of Non Ferrous Metals, 51, No. 6, p.500, (2010)
2. Н.А.Кульчицкий, А.А. Мельников. Нано- и микросистемная техника, №6, с.9, 2011

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

A28 Формирование лазерным излучением токоведущих дорожек на сапфировой плате межсоединений для ИК ФПУ

Новоселов А.Р., Клименко А.Г.

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

Известна возможность использования лазерного инструмента для коррекции межсоединений в интегральных микросхемах [1], но довольно часто возникает необходимость в коррекции плат с электрическими шинами межсоединений, обеспечивающих работу фотоприёмных устройств, чувствительных в инфракрасном спектральном диапазоне. В качестве плат межсоединений, используют сапфир с алюминиевыми токопроводящими дорожками [2]. Создание технологии лазерной коррекции межсоединений на сапфире позволит ускорить, а в некоторых случаях и исключить, необходимость изготовления новых плат межсоединений. Такая технология разработана в ИФП СО РАН. Для формирования новых соединений между алюминиевыми дорожками на сапфире необходимо на поверхность чистого сапфира поверх алюминиевых дорожек нанести слой индия. После этого необходимо перевернуть сапфир (слой индия находится снизу) и расположить сапфир под источником лазерного излучения (длина волны 0,339 мкм, частота повторения 100 Гц, плотность энергии около 3,6 Дж/см²). Необходимо расположить объектив над поверхностью сапфира так, что бы одновременно происходил процесс параобразования на тыльной стороне сапфира и плавление индия лазерным излучением, тогда расплав индия втекает в лунку (канавку) по мере её формирования. Схематичное изображение положения сапфира под лазерным излучением представлено на рис.1.

Плавление индия происходит только в области лазер-материал взаимодействия, остальная часть индия достаточно легко удаляется, например, механически. Сделанные новые дорожки из индия могут быть достаточно большой длины, они не изменяют свои сопротивления (0,1 Ом) достаточно долго (мы повторили измерение сопротивления через 6 месяцев). На рис. 2 показано сформированное лазерным излучением новое межсоединение между двумя контактными площадками. Вид на соединение сквозь сапфир.

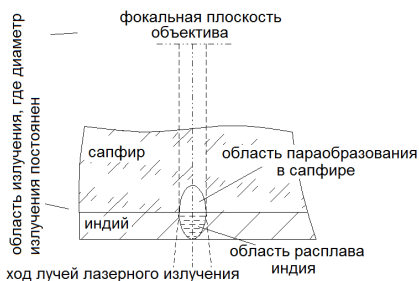


Рис. 1

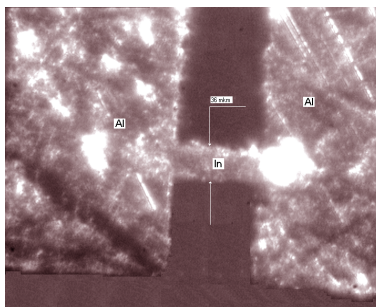


Рис. 2

Литература:

- 1.G.H. Chapman/Laser application to IC defect correction//proceeding SPIE, 1998, V. 3274, P. 79-89
- 2.Chamonal Jean Paul, Mottin Eric, Audebert Patrick, Ravetto Michel, Caes Marcel, Chatard Jean Pierre/Long linear MWIR and LWIR HgCdTe arrays for high resolution imaging//Proceedings of SPIE Vol. 4130, 2000, P. 452-462

A29 Особенности плазменного травления твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$

Писаревский В.К., Соколовский Б.С., Васькив А.П.

Львовский национальный университет имени Ивана Франка, Львов, Украина

Плазменное травление полупроводниковых материалов ионами разных энергий широко используется в производстве детекторов излучений для исходной очистки поверхности полупроводников, модификаций их свойств и разделения фоточувствительных элементов [1]. Проведенные ранее исследования процессов травления $Cd_xHg_{1-x}Te$ ионами ртути и аргона в ВЧ-плазме показали, что в результате травления наблюдается конверсия типа проводимости в материале p -типа, улучшение электрофизических параметров в образцах n -типа проводимости и изменение основных механизмов рекомбинации неравновесных носителей заряда [2]. Вследствие этого важным является выбор рабочих режимов для проведения конкретных технологических операций.

Процессы плазменного травления эпитаксиальных слоев и монокристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$ p - и n -типа проводимости состава $0,18 < x < 0,5$ определяются в значительной степени рабочими параметрами используемой технологической установки: напряжением смещения ($U_{см}$) в разрядном пространстве и давлением рабочего газа. В нашей технологии в качестве рабочего газа использовались аргон или пары ртути. Существенным моментом в последнем случае является тот факт, что процесс травления осуществляется ионами одного из компонентов твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$ – ионами ртути. Большая масса ионов ртути по сравнению с ионами аргона обеспечивает более высокую скорость травления. При изменении давления паров ртути в диапазоне $1,0 \cdot 10^{-1} \div 5 \cdot 10^{-1}$ Па скорость травления $Cd_xHg_{1-x}Te$ изменялась в $1,5 \div 2,0$ раза, в то время как при изменении напряжения смещения от 0,6 до 3,0 кВ скорость травления увеличивалась на $1 \div 2$ порядка. Обработка p - $Cd_xHg_{1-x}Te$ с $x=0,22$ при напряжении смещения 600 В в атмосфере паров ртути и аргона при длительности процесса 30 мин.

приводит к конверсии типа проводимости в слое глубиной 200 и 20 мкм соответственно. Такие значения глубины конверсии можно объяснить исходя из предположения, что при аргоновой плазме механизм модификации свойств $Cd_xHg_{1-x}Te$ обусловлен в основном избыточными атомами междуузельной ртути, в то время как при использовании ВЧ ртутной плазмы доминирующим становится пересыщение поверхности полупроводника ртутью из плазмы.

Исследование поверхности образцов после травления методами атомно-силовой и сканирующей туннельной микроскопии показали, что при напряжении смещения до 1,8 кВ морфология поверхности образцов практически не изменяется, а при дальнейшем увеличении $U_{см}$ скорость травления резко возрастает, проявляются границы блоков, двойники и другие микродефекты. Используя метод рентгеновской дифракции на отражение показано, что глубина нарушенного слоя составляет $1,0 \div 2,0$ мкм при изменении $U_{см}$ от 0,6 до 2,4 кВ.

Плазменное травление $Cd_xHg_{1-x}Te$ ионами инертных газов вызывает появление радиационных дефектов в поверхностном слое, которые ухудшают параметры материала [3]. Проведенные исследования показали, что травление в ртутной плазме приводит к существенному увеличению времени жизни неравновесных носителей заряда в материале как p - так и n -типа проводимости. Для $Cd_xHg_{1-x}Te$ с $x = 0,30$ n -типа с подвижностью электронов $5 \cdot 10^4$ см²/В·с и концентрацией $4 \cdot 10^{14}$ см⁻³ при 77 К травление при $U_{см} = 1,8$ кВ в течении 10 мин. приводит к росту концентрации носителей в 2 раза и росту подвижности до $8 \cdot 10^4$ см²/В·с. Время жизни неравновесных носителей заряда возрастает до десятков микросекунд. Такое изменение свидетельствует о снижении степени компенсации исходного материала. Гальваномагнитные измерения показали, что при травлении формируется n^+ - n структура с толщиной n^+ -слоя $\sim 2,0$ мкм, которая приблизительно соответствует толщине нарушенного слоя. Для тех же составов твердого раствора в материале p -типа с концентрацией дырок $4 \cdot 10^{15}$ см⁻³ и подвижностью 420 см²/В·с травление ионами ртути при $0,6 < U_{см} < 1,4$ кВ вызывает образование слоя n -типа с $\mu \approx 2,0 \cdot 10^5$ см²/В·с и $n \approx 2,0 \cdot 10^{15}$ см⁻³.

В отличие от процессов травления $Cd_xHg_{1-x}Te$ ионами аргона с энергией меньше 500 эВ [4] при использовании ВЧ ртутной плазмы конверсия типа проводимости материалов p -типа наблюдается в диапазоне всех исследуемых составах твердого раствора. При этом толщина конвертируемого слоя в большей степени зависит от концентрации дырок в исходном материале, чем от его состава при тех же условиях травления.

Для разделения фоточувствительных элементов приемников излучения используются низкотемпературные режимы обработки фоторезистов, что накладывает некоторые ограничения на режимы травления. Исследования скорости плазменного травления широкого класса позитивных и негативных фоторезистов показали, что при напряжении смещения до 2,4 кВ и толщине фоторезистов до 2 мкм коэффициент их защитного действия составляет $6 \div 12$. Это позволяет разрезать пластины толщиной до 50 мкм на отдельные элементы 50×50 мкм. Профили травления $Cd_xHg_{1-x}Te$ показывают, что крутизна стенок и скорость травления зависят от напряжения смещения. Установлено, что когда ширина углубления, которое вытравливается, меньше двойной величины линейного отклонения от вертикали, угол отклонения стенки от вертикали стремится к нулю. Этот эффект можно объяснить наличием травления материала упругоотраженными ионами от противоположных стенок профиля.

Результаты исследований особенностей плазменного травления $Cd_xHg_{1-x}Te$ использованы при проведении технологических операций по изготовлению детекторов ИК излучения фотодиодного и фоторезистивного типов.

1. Рогольский А. Инфракрасные детекторы; [пер. с англ. А.Войцеховского]. Новосибирск: Наука, 2003.– 627с.
2. Писаревский В. К. Модификация свойств КРТ при плазменном травлении/ В.К. Писаревский, М. И. Лозинская, О. П. Сторчун, Б. О. Симкив, Г. В. Шевченко // Новые технологии. – 2010. – №1 (27). – С. 113-117.
3. Мынбаев К.Д. Модифицирование свойств $Cd_xHg_{1-x}Te$ низкоэнергетическими ионами/ К.Д. Мынбаев, В.И.Иванов-Омский //Физика и техника полупроводников. – 2003. – Т.37. – №10. – С. –1-26.
4. Bogoboyashchyu V.V. The nature of compositional dependence of p-n junction depth in ion-milled p- $Cd_xHg_{1-x}Te$ / V.V. Bogoboyashchyu, I.I.Izhnin, K.D.Mynbaev//Semicond. Sci. Technol. –2006. – Vol.21, N2. – P.116-123.

А30 Разработка микрокриогенной системы на базе пульсационной трубы на температурный уровень 80 К

Липин М.В., Перфильев В.А., Поляков П.Б., Шахметов Е.Б.

ООО «НТК «Криогенная техника», Омск, Россия

Для ряда прикладных применений необходимы микрокриогенные системы охлаждения с холодопроизводительностью 4 ± 5 Вт на температурном уровне 80 К. В ООО «НТК «Криогенная техника» проведена разработка микрокриогенной системы (МКС) на основе одноступенчатого охладителя с пульсационной трубой и компрессора с линейным приводом. На рис. 1 представлена 3D модель разрабатываемого охладителя. Преимущество таких охладителей в отсутствии каких-либо движущихся частей, что упрощает и удешевляет конструкцию, повышает надежность, существенно увеличивает ресурс и снижает вибрации на объекте охлаждения по сравнению с традиционно применяемыми МКС Сплит - Стирлинг.

В ООО «НТК «Криогенная техника» работы по созданию охладителей с пульсационной трубой в инициативном порядке начаты в 2007 г. Был разработан и изготовлен макет МКС с пульсационной трубой холодопроизводительностью до 1 Вт. Для МКС с пульсационной трубой была разработана программа термодинамического расчета «PULS3-5». Подход, используемый в «PULS3-5», базируется на итерационном методе для расчета термодинамических уравнений. Проведенные испытания макета криоохладителя позволили уточнить методику термодинамического расчета, что обеспечило удовлетворительную сходимостью результатов расчета и испытаний при разработке новых МКС.

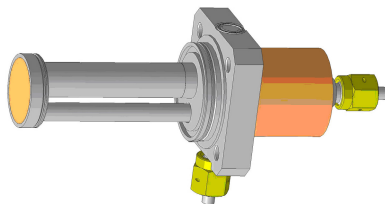


Рис. 1. 3D модель разрабатываемого охладителя (соединительный трубопровод и ресивер не показаны)

На основании полученных теоретических результатов по программе «PULS3-5», все элементы разрабатываемой пульсационной трубы были оптимизированы для МКС холодопроизводительностью 4 Вт на температурном уровне 80 К при мощности не

более 150 Вт, работающей при температуре окружающей среды 313 К и давлении заправки 2,6 МПа.

Приводятся результаты оптимизации конструкции ГКМ и расчетных исследований ее характеристик, таких, как влияние на холодопроизводительность и КПД размеров основного отверстия, диаметра и длины пульсационной трубы, наличия или отсутствия перепускного отверстия, объема ресивера, температуры корпуса и др. На рис. 2 показана зависимость холодопроизводительности от температуры корпуса при постоянном ходе компрессорных поршней. На рис. 3 представлена расчетная зависимость холодопроизводительности МКС от полезной мощности для разрабатываемой МКС.

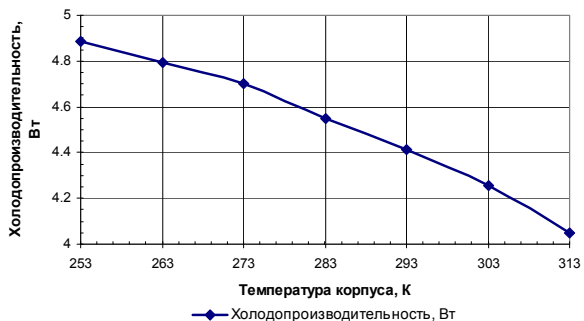


Рис. 2. Зависимость холодопроизводительности от температуры корпуса

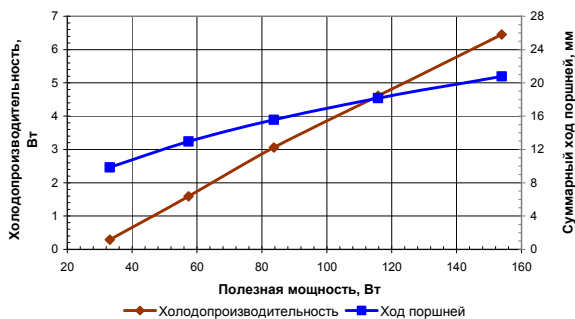


Рис. 3. Расчетная зависимость холодопроизводительности МКС от полезной мощности

А31 Компьютерное моделирование изображений, формируемых тепловизионными приборами

Касаткин И.В.

ОАО «ЦКБ «Точприбор», Новосибирск, Россия

Компьютерное математическое моделирование на сегодняшний день является одним из основных способов определения дальности действия тепловизионных приборов. Замена реального прибора его математической моделью дает возможность оценить его соответствие основным техническим требованиям, даже в условиях отсутствия рабочего прибора.

Уровень вычислительных мощностей и программного обеспечения современных компьютеров дает принципиальную возможность дополнять результаты расчета проектируемых тепловизоров моделями изображений, идентичными по своим параметрам, изображениям реальных тепловизоров. Это открывает новые области применения подобных моделей. Например, при отработке алгоритмов автоматического обнаружения и распознавания целей или при обучении и аттестации потенциальных наблюдателей.

В докладе рассматривается возможный алгоритм компьютерного моделирования изображений, формируемых тепловизионными приборами, и предложена его реализация в программной среде MatLab. Разработана компьютерная программа, в которой реализованы следующие операции:

- создание двумерного силуэта цели типа танк или мира;
- удаление цели на заданную дальность;
- размытие изображения двумерного силуэта цели в приемном объективе;
- формирование энергетического окраса силуэта цели;
- дискретизация изображения на фотоприемном устройстве;
- формирование шумовой картины;
- моделирование системы автоматического регулирования яркости и контраста;
- вывод синтезированного изображения на экран компьютера.

Компьютерная программа основана на предварительном обсчете каждого кадра изображения с последующим выводом на экран с заданной частотой определенной последовательности кадров. В программе реализована математическая модель, основанная на фундаментальных законах генерации, распространения и преобразования излучения среднего и дальнего инфракрасного диапазонов. Учитывается влияние более 20 входных параметров:

- параметры цели:
 - количество штрихов миры;
- вертикальный размер и дальность расположения цели;
 - температура цели и фона;
 - коэффициент излучения цели и фона;
- параметры объектива:
 - фокусное расстояние и диаметр входного зрачка;
 - интегральный коэффициент пропускания;
 - диаметр кружка рассеяния;
- параметры атмосферы:
 - метеорологическая дальность видимости;
 - температура и влажность воздуха;
- параметры фотоприемного устройства:
 - рабочий спектральный диапазон;

- количество чувствительных элементов по горизонтали и вертикали;
- размер чувствительного элемента;
- обнаружительная способность;
- температурная постоянная времени или время накопления;
- параметры обработки:
- значение яркости и контраста изображения;
- общее количество кадров в видеопоследовательности;
- количество кадров накопления

Последовательность операций при моделировании изображения представлена на рисунке 1.

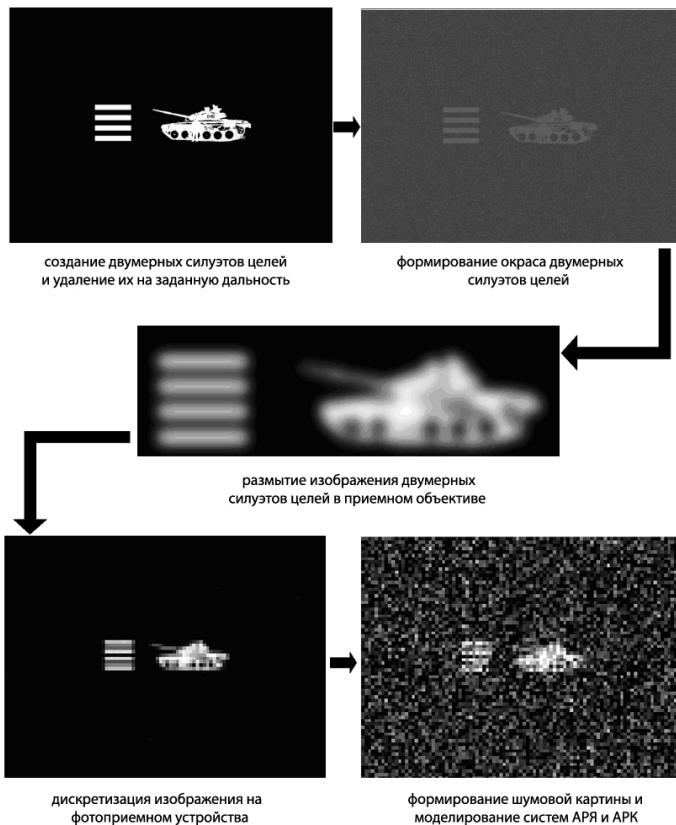


Рисунок 1 – Последовательность операций при моделировании изображения

А32 Фотозлектрические характеристики диодов на основе HgCdTe/Si(310)

Сорочкин А.В., Варавин В.С., Предеин А.В., Сабинина И.В., Якушев М.В.

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

В настоящее время твердый раствор HgCdTe (КРТ) является наиболее широко используемым полупроводником с изменяемой шириной запрещенной зоны для создания фотодетекторов работающих в инфракрасной (ИК) области спектра. Основным направлением является производство инфракрасных матриц фокальной плоскости (ИКМФП) большого формата.

Целью данной работы является исследование фотозлектрических характеристик пикселя матричного фотоприемника. Исследуемый объект представляет собой матрицу фотодиодов, изготовленных по планарной технологии на основе гетероструктуры HgCdTe/CdTe/ZnTe/Si(310), выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Использование подложек из кремния наиболее оптимально с точки зрения совместимости с микросхемами считывания и обработки сигнала. Проблемы, связанные с большим рассогласованием постоянных решеток Si и HgCdTe, были решены при помощи введения буферных слоев CdTe и ZnTe. Для получения *p-n* перехода была использована методика ионной имплантации бором.

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) были выращены гетероструктуры HgCdTe/CdTe/ZnTe/Si(310). Непосредственно после роста такая структуры имеет *n*-тип проводимости. Для изменения типа проводимости на *p*-тип проводились отжиги в инертной атмосфере. На основе полученных гетероструктур *p*-типа проводимости с помощью ионной имплантации бора были изготовлены матричные фоточувствительные элементы.

Для всех структур были проведены измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ), дифференциального сопротивления и ампер-ваттной чувствительности фотодиодов в криогенном азотном термостате. Измерения вольт-амперных характеристик (Рис. 1) проводились в пределах небольшой области на образце, что позволило избежать эффектов, связанных даже с малой неоднородностью состава и толщины КРТ.

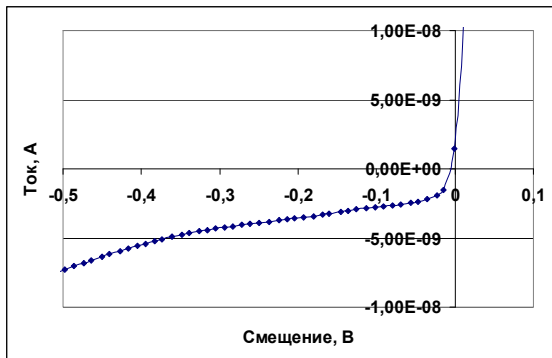


Рисунок 4 Типичная темновая вольт-амперная характеристика фотодиода на основе КРТ

Обнаружено, что зависимость темного тока от напряжения в области малых обратных смещений имеет довольно сильный наклон, что может означать преобладание нефундаментальных механизмов токопереноса в фотодиоде (предполагается, что фундаментальным является только диффузионный ток). Сравнение с расчетными данными показало, что наиболее весомый вклад вносят три механизма: генерационно-рекомбинационный ток, туннелирование через ловушки и ток через параллельное диоду шунтирующее сопротивление R_{sh} , которое подчиняется закону Ома.

Из измеренных ВАХ были рассчитаны произведение R_0A дифференциального сопротивления при нулевом смещении R_0 на его оптическую площадь A , значение которого используют для характеристики фотодиодов. Фотодиоды на основе $HgCdTe/Si(310)$, работающие при температуре 77К, имеют произведение R_0A , значительно превосходящее значения, необходимые для реализации режима ограничения фоновыми шумами. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о высоком качестве изготовленных структур.

A33 Перспективы применения твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ с $x>0,3$ для фотоприемников с расширенным спектральным диапазоном

Акимов А.Н., Ищенко Д.В., Климов А.Э., Пашин Н.С., Шерстякова В.Н., Шумский В.Н.

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

При гелиевых температурах в твердых растворах $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ (СОТ:In) с составом $0,22 < x < 0,3$ уровень Ферми стабилизируется в запрещенной зоне [1,2]. Большая фоточувствительность и низкая проводимость пленок СОТ:In без освещения позволяют создавать на их основе глубокоохлаждаемые высокочувствительные фотоприемники дальнего ИК диапазона, в том числе матричного типа [3]. В указанном диапазоне составов красная граница чувствительности изменяется примерно от 17,5 до 45,9 мкм, а для наиболее исследованных составов с $x=0,24-0,26$ она находится вблизи 20 мкм.

Для получения высокой обнаружительной способности необходимо иметь большое время жизни возбужденных светом носителей заряда и одновременно низкий уровень шума. Такие условия реализуются в так называемом «дизлектрическом состоянии», которое хорошо исследовано лишь в узкой области составов. Так, в [4] показано, что, в зависимости от уровня полевой и оптической инжекции, преобладающими механизмами рекомбинации для составов $x=0,24-0,26$ являются излучательная и оже-рекомбинация. Кроме того, имеет место захват неравновесных электронов на локализованные центры в запрещенной зоне.

Целью настоящей работы являлось комплексное исследование гальваномагнитных и фотоэлектрических свойств пленок СОТ:In с $x>0,3$ в интервале температур 4,2-300 К и определение перспективности их применения для создания фотоприемников с диапазоном чувствительности вплоть до 40-50 мкм.

Пленки СОТ выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксией на подложках VaF_2 . Легирование индием проводилось как в процессе эпитаксии, так методом диффузии индия из $InTe$ при послеростовом отжиге.

На Рис. 1 приведены температурные зависимости тока без и при освещении от калиброванного источника излучения для пленок с двумя разными составами.

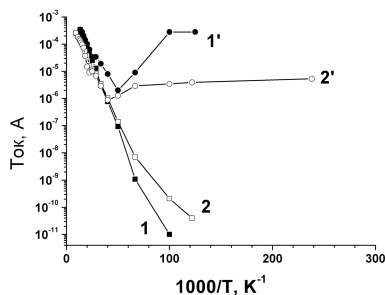


Рис. 1. Температурная зависимость тока без (1, 2) и при освещении (1', 2'). 1, 1' – образец с $x=0,3$, 2, 2' – образец с $x=0,33$

Без освещения в образцах при гелиевых температурах наблюдается инжекционный ток, который ведет к появлению некомпенсированного заряда электронов. При освещении в стационарных условиях возбужденные светом электроны и дырки рекомбинируют, причем в рекомбинации играет роль суммарная концентрация как возбужденных светом, так и инжектированных из контактов носителей заряда.

Видно, что для обоих показанных на рисунке составов без освещения наблюдается сильное экспоненциальное уменьшение концентрации носителей заряда с температурой вплоть до примерно $T=10$ К и большая фоточувствительность при $T < 25$ К. В отличие от [2], переход в низкопроводящее состояние без освещения при гелиевых температурах наблюдается и для пленок с $x=0,33$.

Измерялись релаксационные зависимости тока в температурном диапазоне $T=4,2-15$ К, из которых определялись времена жизни неравновесных носителей заряда. Полученная температурная зависимость времени жизни качественно совпадает с рассчитанными зависимостями при преобладании излучательной рекомбинации.

Измерены и проанализированы вольтамперные характеристики. Изготовлен прототип фотоприемника на основе СОТ:In состава $x=0,33$ и определены его пороговые характеристики по моделям АЧТ с различной температурой.

[1] Волков Б.А., Рябова Л.И., Хохлов Д.Р. УФН, Т. 172, №.8, с. 875 (2002).

[2] Такаока С., Итога Т., Мураса К., Jap. Jour. Appl. Phys., Vol. 23, No. 2, p. 216 (1984).

[3] Климов А. Э., Шумский В. Н., в кн.: «Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона», « Наука», Новосибирск, 2001, с. 65.

[4] Климов А. Э., Шумский В. Н., ФТП, Т.42, № 2, с. 147 (2008).

А34 Легирование пленок $Pb_{1-x}Sn_xTe$ германием и индием методом диффузионного отжига

¹ Акимов А.Н., ¹ Васильева Л.Ф., ¹ Климов А.Э., ² Королюк В.Н., ¹ Пашин Н.С.,
¹ Шумский В.Н.

¹ *Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия*

² *Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия*

Твердые растворы $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ (СОТ) с составом $x=0,22-0,29$ обладают почти собственной проводимостью вплоть до температуры $T=4,2$ К и высокой фоточувствительностью при $T < 20$ К, что делает их перспективными для создания фотоприемников дальнего ИК диапазона [1,2].

Одним из наиболее распространенных способов получения материалов заданного состава является двух- (или трех-температурный) отжиг. Отжиги обеспечивают более равномерное, по сравнению с легированием в процессе роста, распределение примесных атомов и воспроизводимость гальваномагнитных и фотоэлектрических свойств материала.

В работах [3,4] показано, что добавление германия в твердые растворы свинца и олова способствует улучшению распределения примеси индия по объему при росте и отжиге слоев.

В данной работе исследовано влияние отклонения от стехиометрии (δ) твердого раствора $(Pb_{1-x}Sn_x)_{1+\delta}Te_{1-\delta}$ и источника германия ($GeTe$), а также отдельного или совместного введения индия и германия, на механизм внедрения примеси в пленки СОТ в процессе диффузии из газовой фазы.

Пленки толщиной 1,5-2 мкм как n - $(Pb_{1-x}Sn_x)_{1+\delta}Te_{1-\delta}$, так и p -типа проводимости $(Pb_{1-x}Sn_x)_{1-\delta}Te_{1+\delta}$ с концентрацией носителей заряда $10^{17}-10^{18}$ см⁻³ составов $x=0,2-0,29$ были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках из BaF_2 . В качестве источника использовалась поликристаллическая шихта $(Pb_{1-x}Sn_x)_{1+\delta}Te_{1-\delta}$, отожженная на металлическую сторону при температуре 845-860 °С. Для коррекции отклонения от стехиометрии состава δ использовался чистый теллур.

Диффузии In проводилась из газовой фазы в пленки твердого раствора в закрытой системе в атмосфере водорода. Состав по x и δ контролировался шихтой из $(Pb_{1-x}Sn_x)_{1+\delta}Te_{1-\delta}$, где x и δ соответствовали отжигаемому образцу, а температура шихты была равна температуре образца. Диффузия In проводилась из сплава $In_{0,85}Te_{0,15}$. Образец, шихта и сплав $In_{0,85}Te_{0,15}$ находились при одной температуре, но не соприкасались друг с другом. Газовая фаза над отжигаемой пленкой до температуры около 732 К состояла из индия, при температуре выше 746 К – из In и In_2Te [5] и компонент паров шихты и пленки: $PbTe$, $SnTe$, Pb , Sn , Te_2 [6], давление которых определялось температурой отжига. Диффузия Ge проводилась из источника $Ge_{1\pm\delta}Te_{1\pm\delta}$ как с избытком теллура, так и с недостатком. Газовая фаза над источником состояла преимущественно из $GeTe$, Te_2 и $GeTe_2$ в интервале температур 700-850 К [7]. Температура шихты из $Ge_{1\pm\delta}Te_{1\pm\delta}$ выбиралась в соответствии $P_{GeTe} - x$ – фазовой диаграммой для получения пленок $[(Pb_{1-x}Sn_x)_{1-y}Ge_y]_{1-\delta}Te_{1+\delta}$ заданного состава. Согласно закону Рауля, необходимое парциальное давление $GeTe$ над образцом должно быть равно $y \cdot P_{GeTe}$, где P_{GeTe} – давление $GeTe$ при температуре отжигаемого образца.

Концентрация носителей заряда и их подвижность при температуре $T=77$ К измерялись методом Холла сразу после роста пленок и после отжига. Кроме того, для

некоторых образцов снимались температурные зависимости концентрации и подвижности носителей заряда от $T=77$ К до $T=4,2$ К.

В результате проведенных экспериментов получены пленки разного состава по x и δ с разным количеством индия и германия в пленках. Для анализа состава пленок как после роста, так и после отжига использовался рентгеновский микроанализатор типа "САМЕВАХ MICRO". Ускоряющее напряжение составляло 20 кВ.

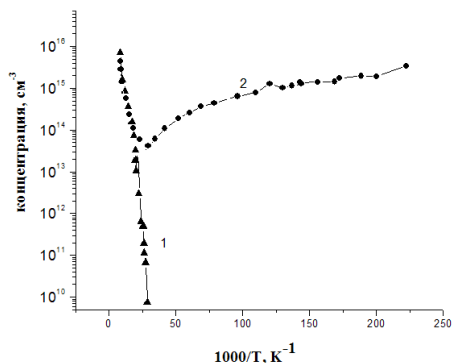


Рис. 1. Температурная зависимость концентрации носителей заряда в пленке после диффузии Ge и In. 1 - без освещения, 2 - при освещении.

При отжиге в присутствии шихты $\text{In}_{0,85}\text{Te}_{0,15}$ предварительно легированных германием пленок концентрация Ge в них вследствие испарения его соединений снижалась примерно в 5 раз. Отжиг пленок $\text{Pb}_{0,73}\text{Sn}_{0,27}\text{Te}$ одновременно в парах $\text{In}_{0,85}\text{Te}_{0,15}$ и $\text{Ge}_{0,502}\text{Te}_{0,498}$ препятствовал испарению Ge из пленки и увеличивал скорость диффузии In. После такого отжига (рисунок 1) при $T < 30$ К пленки имели концентрацию носителей заряда $< 10^{10}$ см^{-3} при $T < 40$ К и высокую фоточувствительность.

[1] Климов А.Э., Шумский В.Н. Многоэлементные фотоприемные устройства дальнего ИК - диапазона на основе гетероэпитаксиальных пленок PbSnTe , легированных In, на BaF_2 .-Гл. 6 в «Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона», «Наука», Новосибирск, 2001.

[2] Chishko V.F., Нгуаров V.T., Kasatkin I.L., Osipov V.V., Slinko E.I., Smolin O.V. and Tretinik V.V. Inf. Phys., Vol. 33, No. 3, p. 197 (1992).

[3] Немов С.А., Мусихин С.Ф., Парфеньев Р.В., Светлов В.Н., Попов Д.И., Прошин В.И., Шамшур Д.В. ФТТ, Т. 37, в. 11, с. 3523 (1995).

[4] Попов Д.И., Мусихин С.Ф., Немов С.А., Парфеньев Р.В., Макарова Т.Л., Светлов В.Н. ФТТ, Т. 37, в. 1, с. 194 (1995).

[5] Бельшева Г.А., Анохина Е.В., Сить Юе, Демин В.Н., Зломанов В.П. Синтез фаз и исследование состава пара в системе In-Te. Неорганические материалы, Т. 33, в. 4, с. 421 (1997).

[6] Зломанов В.П., Новоселова А.В. «Р-Т-х – диаграммы состояния систем металл-халькоген», «Наука», Москва, 1987.

[7] Молчанов М.В., Алиханян А.С., Зломанов В.П., Яшина Л.В. Масс-спектральное исследование газовой фазы над теллуридом германия. Неорганические материалы, Т. 38, в. 6, с. 682 (2002).

A35 Матричный монолитный фотоприемник спектрального диапазон 1 – 4 мкм с термоэлектрическим охлаждением

¹ Бородин Д.В., Осипов Ю.В., Скрылёв А.С., Глобус Е.Р., Чеканова Г.В., Бутров Ю.П.,
Белоконев В.М., Васильев В.В.

ФГУП «НПП «Пульсар», Москва, Россия

ФГУП «Альфа», Москва, Россия

ООО «РТК Иннекс», Москва, Россия

В настоящее время широкое распространение получили ФПУ на основе микроболометрических матриц. Однако при всех преимуществах, такие приемники отличаются принципиальным ограничением - их постоянная времени составляет ~10 мс. Для регистрации быстропротекающих процессов они не пригодны.

Инфракрасные приемники спектральных диапазонов 3-5 и 8-12 мкм на основе узкозонных материалов, демонстрируют высокое быстродействие и предельные параметры по чувствительности, однако имеют низкую рабочую температуру (~77 К), а их изготовление включает трудоемкий процесс гибридации с использованием технологии перевернутого монтажа на индиевых микростолбиках.

Разработанный фотоприемник представляет собой кремниевый кристалл КМОП микросхемы первичного преобразования с осажденным непосредственно на ее поверхность фоточувствительным слоем, в качестве которого использовался PbSe. Известно, что собственная постоянная времени фоторезисторов PbSe при комнатной температуре составляет ~5 мкс. Микросхема осуществляет электронное сканирование массива ячеек, строчное интегрирование сигнала и последовательный вывод. Изготовлены фотоприемники двух форматов: 64x64 ячейки с периодом расположения по обем осям 100 мкм и 160x120 ячеек с периодом 60 мкм. Минимальное время вывода кадра формата 64x64 ячеек составляет 250 мкс.

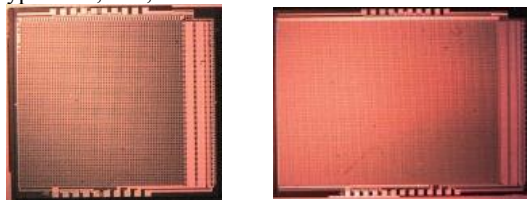
Во время интегрирования, часть втекающего в микросхему тока фотодетектора вычиталась (компенсировалась), что позволяло избежать переполнения емкости интегрирования темновым током и сохранить приемлемый коэффициент преобразования заряда в напряжение. Компенсацию возможно проводить двумя способами. Первый - это токовая компенсация, подобно используемой в схеме [1]. Второй - зарядовая компенсация порциями постоянной величины.

На этапе отработки технологии осаждения чувствительного слоя также использовалась другая КМОП микросхема формата 64x64 ячейки, обеспечивающая прямой последовательный доступ ко всем элементам фотоматрицы и позволяющая проводить прямые фотоэлектрические измерения всех фотоэлементов без каких-либо существенных искажений, которые могла бы внести микросхема считывания.

Измерения проводились как при комнатной температуре с пассивной термостабилизацией, так и в вакуумном корпусе с оптическим окном и термоэлектрическим охладителем. Время интегрирования при измерениях изменялось от 5 мкс до 60 мкс. Облучение проводилось от модели АЧТ с температурой 573К. Для модуляции излучения использовался вращающийся механический прерыватель. Измерение аналогового выходного сигнала проводилось с использованием 14-разрядного АЦП с максимальной частотой дискретизации 10 МГц.

Полученная на тестовых кристаллах матрицы средняя обнаружительная способность D^* составляет $1,0 \cdot 10^9$ см·Гц^{0,5}/Вт при комнатной температуре. С охлаждением D^* возрастает более чем на порядок. Разброс чувствительности ячеек по матрице не превышал 30%. Ниже приведены фотографии исследованных монолитных фотоприемников.

Обработка технологии осаждения слоя PbSe непосредственно на поверхность микросхемы позволяет перейти к созданию подобной фотоприемной матрицы с кадровым накоплением (функционально аналогичных [2]), однако для создания подобных мультиплексоров необходимо использовать КМОП технологии с нормами проектирования уровня 0,25-0,35 мкм.



1. Д.В.Бородин, Ю.В.Осипов, А.Х.Давыдов, В.В.Васильев. 128 канальный мультиплексор с индивидуальной компенсацией темнового тока чувствительных элементов. Научно-технический сборник "Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы", 2011 г., № 2(227), С. 64-69

2. G.Vergana, L.J.Gomes, V.Villamayor, M.Alvarez at al. Monolithic uncooled IR detectors of polycrystalline PbSe. A real alternative. Proceeding of SPIE, 6542-65 (2007).

А36 Установка для исследования эффективности работы режима временной задержки и накопления в многорядных фотоприёмных устройствах

¹Мазин М.Г., ^{1,2}Лазарев П.С., ^{1,2}Соляков В.Н., ¹Хамидуллин К.А., ¹Юдовская А.Д.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (ГУ), Долгопрудный, Россия

Оптико-электронные приборы (ОЭП) со сканированием получили широкое применение в тепловизионной и тепlopеленгационной технике. Построены они преимущественно на основе многорядных фотоприёмных устройств (МФПУ) с временной задержкой и накоплением (ВЗН). Режим ВЗН позволяет увеличить отношение сигнал/шум в \sqrt{N} (как следствие повысить чувствительность ОЭП в целом) за счет запоминания и суммирования сигналов от N фоточувствительных элементов (ФЧЭ), расположенных в направлении сканирования изображения, уменьшить разброс чувствительности по каналам МФПУ. Также в этом режиме наличие дефектных ФЧЭ не приводит к дефектности строки изображения, а только к незначительному снижению отношения сигнал/шум в строке, содержащей дефектный элемент. В связи с этим актуальна задача исследования эффективности работы режима ВЗН в ОЭП построенных на основе МФПУ с ВЗН.

В качестве критерия корректной работы режима ВЗН в многорядных ФПУ с соответствующим блоком цифровой обработки (БЦО) предлагается результат сравнения функции рассеяния линии (ФРЛ) конкретного формирователя сигналов изображения (ФСИ) с «идеальным». Под формирователем сигналов изображения будем понимать МФПУ с блоком цифровой обработки сигналов.

В настоящей работе представлены результаты разработки стенда для исследования качества работы ФСИ на основе МФПУ с ВЗН, работающих в спектральных диапазонах 3...5 и 8...12 мкм. Блок-схема стенда показана на рисунке 1.

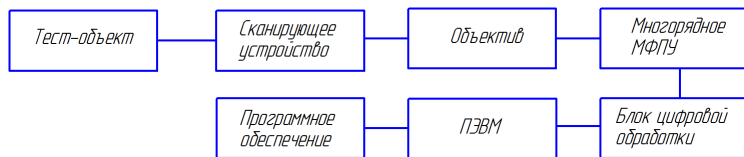


Рисунок 1. Блок-схема стенда

Тест-объектом является нагретая нихромовая нить, находящаяся на расстоянии нескольких метров от ФСИ. При этом угловой размер нити существенно меньше углового разрешения объектива и её можно считать бесконечно тонкой светящейся линией. Характеристики применяемого прецизионного сканера известны. Оценка показала, что его влияние на ФРЛ незначительно. В качестве объектива, в диапазоне 3...5 мкм используется разработанный во ФГУП «НПО «Орион» объектив «Орион-80», а в диапазоне 8...12 мкм объектив «МАКРО-70». Качество изображения применяемых объективов достаточно высоко: для «Орион-80» - концентрация энергии в пятне 18 мкм составляет 80%; для «МАКРО-70» - концентрация энергии в пятне 34 мкм составляет 80%.

Методически измерения проводились следующим образом: сначала измерялась ФРЛ при выключенном режиме ВЗН с каждого из рядов ФЧЭ, затем при включенном режиме ВЗН измерялась интегральная ФРЛ. Критерием качества работы режима ВЗН является результат сравнения ФРЛ конкретного ФСИ и «идеального».

Основные искажения ФРЛ ФСИ возникают за счет несинхронной работы сканера и БЦО реального тепловизионного прибора. То есть если период опроса не синхронизирован со сканером, то это приводит к уширению ФРЛ и как следствие к падению суммарного сигнала.

Представлены результаты моделирования аппаратных функций, полученных для «идеального» ФСИ и для ФСИ, в котором сканер работает несинхронно с БЦО. Также представлены результаты экспериментальной апробации установки с МФПУ на основе $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ формата 4x288.

Литература:

1. Дж. Ллойд. Системы тепловидения. – М.: Мир, 1978г. – 414 с.
2. В.К. Кирилловский. Оптические измерения. Часть 2. Теория чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения. СПб.: ГИТМО, 2003 г. – 60 с.
3. Дж. Гудмен. Введение в Фурье-оптику. – М.: Мир, 1970г. – 364 с.
4. Филачев А.М., Таубкин И.И., Тришенков М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. – М.: Физматкнига, 2005г. – 384 с.

А37 Влияние объемного наносекундного разряда в атмосферах воздуха, аргона и азота на электрофизические свойства узкозонных твердых растворов CdHgTe

¹ Войцеховский А.В., ¹ Коротаяев А.Г., ¹ Петерс А.С., ¹ Григорьев Д.В., ¹ Коханенко А.П.,
² Тарасенко В.Ф., ² Шулепов М.А.

¹ Томский государственный университет, Томск, Россия
² Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

В настоящее время разряды различных типов и электронные пучки широко используются для модификации приповерхностных слоев различных материалов. Особенностью подобных разрядов является комплексное воздействие плазмы плотного наносекундного разряда с удельной мощностью энерговыклада в сотни мегаватт на кубический сантиметр, сверхкороткого электронного пучка с широким энергетическим спектром и оптического излучения различных спектральных диапазонов из плазмы разряда.

Цель настоящей работы являлось исследование влияния объемного наносекундного разряда в различных газовых средах атмосферного давления на электрофизические свойства эпитаксиального материала $Cd_xHg_{1-x}Te$, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Для проведения исследований были подготовлены 3 серии образцов эпитаксиальных пленок КРТ p -типа проводимости ($p=1,1 \div 2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\mu_p=300 \div 500 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии в ИФП СО РАН г. Новосибирска. Подготовленные образцы размещались на медном аноде в газовом диоде. В качестве источника импульсного напряжения использовался генератор РАДАН-220, формировавший импульсы напряжения с амплитудой $\sim 230 \text{ кВ}$ (напряжение холостого хода), длительностью импульса на полувысоте $\sim 2 \text{ нс}$ (на согласованной нагрузке) и временем нарастания $\sim 0,5 \text{ нс}$. Облучение образцов проводилось в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов

1 Гц. Воздействие проводилось в диапазоне $100 \div 1200$ импульсов для серии образцов облученных в воздухе и 600, 1200 импульсов при облучении в атмосфере аргона и азота соответственно.

Электрофизические параметры образцов КРТ до и после воздействия разряда определялись из измерений эффекта Холла методом Ван дер Пау. Измерения проводились при постоянном токе, протекающем через образец ($I=1 \text{ mA}$), для двух направлений тока и двух направлений постоянного магнитного поля ($B=0 \div 0,67 \text{ Тл}$).

Анализ результатов измерения электрофизических параметров образцов эпитаксиальных пленок КРТ, подвергнутых воздействию в атмосфере воздуха показал, что после облучения в диапазоне $100 \div 1200$ импульсов для всех образцов наблюдается увеличение проводимости. Причем для образцов, облученных в диапазоне импульсов от 100 до 400 наблюдается уменьшение

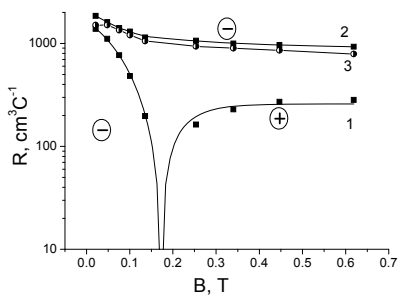


Рисунок 1. Полевая зависимость коэффициента Холла эпитаксиальных пленок КРТ до (1), после (2) и через 3 месяца (3) после воздействия 600 импульсов объемного разряда в воздухе.

значения коэффициента Холла. При этом на полевой зависимости коэффициента Холла наблюдается сдвиг точки инверсии знака коэффициента Холла в область более высоких магнитных полей от значения 0,17 Тл до значения 0,28 Тл.

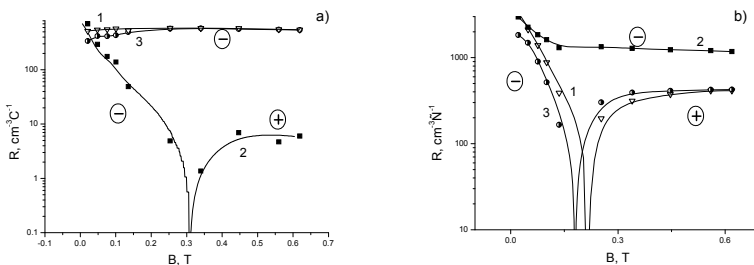


Рисунок 2. Полевая зависимость коэффициента Холла эпитаксиальных пленок КРТ до (1), после (2) и через 3 месяца (3) после воздействия объемного разряда в атмосфере: а) - азота (1200 импульсов); б) - аргона (600 импульсов).

Увеличение числа импульсов воздействия объемного разряда до значения 600 импульсов приводит к инверсии знака коэффициента Холла в диапазоне более 0,2 Тл (рисунок 1). Дальнейшее увеличение числа импульсов воздействия приводит к уменьшению значения коэффициента Холла. Было выдвинуто предположение о том, что на поверхности или в приповерхностной области пленки образуется высокопроводящий слой *n*-типа, параметры которого таковы, что измеряемая полевая зависимость коэффициента Холла соответствует *n*-типу проводимости. Кроме того отмечено отсутствие релаксации электрофизических параметров облученных образцов в течении 3 месяцев (рисунок 1).

Для образцов, облученных в атмосфере аргона и азота, наблюдается изменение полевой зависимости коэффициента Холла аналогично случаю облучения в воздухе. Для образца, облученного при 1200 импульсов в атмосфере азота, после облучения в области 0,3 Тл наблюдается инверсия знака коэффициента Холла, которой нет на исходной полевой зависимости (рис. 2а); а для образца, облученного при 600 импульсах в атмосфере аргона, после облучения для полевой зависимости коэффициента Холла заметно изменение знака в области более 0,2 Тл (рис. 2б). Полевая зависимость данного образца соответствует полевой зависимости для материала *n*-типа проводимости. Было выдвинуто предположение о том, что на поверхности или в приповерхностной области пленки образуется высокопроводящий слой *n*-типа аналогичный случаю облучения в воздухе, параметры которого таковы, что измеряемая полевая зависимость коэффициента Холла соответствует *n*-типу проводимости. Интегральная проводимость образующегося высокопроводящего слоя *n*-типа составляет порядка 10^{-2} Ом^{-1} при облучении в атмосфере азота и $5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}$ при облучении в атмосфере аргона. Также отмечена релаксация электрофизических параметров облученных эпитаксиальных пленок к исходным значениям в течение 6 месяцев (рисунок 2, кривые 3).

Таким образом, полученные экспериментальные данные показывают, что воздействие импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе, аргоне и азоте атмосферного давления приводит к изменению электрофизических свойств эпитаксиальных пленок КРТ, которое обусловлено, образованием в процессе воздействия приповерхностного высокопроводящего слоя *n*-типа проводимости. Полученные первые результаты показывают возможность применения подобных типов

воздействий для разработки технологий целенаправленного изменения свойств узкозонных твердых растворов КРТ.

Работа поддержана грантом РФФИ № 09-08-0030-а и проектом ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» ГК № 02.740.11.0562.

A38 Электрические и оптические свойства МЛЭ гетероэпитаксиальных структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенных на кремниевых подложках

¹Ижнин И.И., ¹Ижнин А.И., ¹Савицкий Г.В., ²Фицыч А.И., ³Якушев М.В.,
³Дворецкий С.А., ³Сидоров Ю.Г., ³Сорочкин А.В., ³Варавин В.С., ⁴Баженов Н.Л.,
⁴Шиляев А.В., ⁴Мынбаев К.Д.

¹НИИ материалов НПП «Карат», Львов, Украина

²Львовский национальный университет им. И. Франко, Львов, Украина

³Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

⁴ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Исследованы электрические и оптические свойства гетероэпитаксиальных структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенных на кремниевых подложках, и имеющих состав активной области $x=0,23-0,43$, актуальный для устройств фотозлектроники среднего и дальнего инфракрасного диапазона. Структуры были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках Si(310) с использованием буферных слоёв ZnTe и CdTe и непосредственно после роста имели электронный тип проводимости. Часть структур после выращивания отжигалась в атмосфере He ($245-265^\circ\text{C}$, 4-5 часов) для приведения к p -типу проводимости.

Электрические свойства структур изучались путём измерения полевых зависимостей коэффициента Холла и проводимости при температуре $T=77\text{ K}$ в сочетании с низкоэнергетической ионной обработкой (НИО) при $T=300\text{ K}$. Оптические свойства структур исследовались путём записи спектров оптического пропускания при $T=300\text{ K}$ и фотолюминесценции (ФЛ) в диапазоне $T=4,2-300\text{ K}$.

Исходные (as-grown) структуры имели низкую концентрацию n_{77} и низкую подвижность μ_{n77} носителей, что позволяло предположить значительную электрическую компенсацию. НИО обычно приводит к изменению электрических параметров КРТ n -типа, уменьшая степень компенсации, а для материала с p -типом проводимости, - к конверсии в n -тип; такой эффект имел место и в исследованных структурах. При старении обработанных образцов, по мере распада созданных НИО дефектов, наблюдалось уменьшение n_{77} и увеличение μ_{n77} . Для всех исследованных структур релаксация происходила по близкому сценарию и носила экспоненциальный характер. На рис. 1 представлена релаксация n_{77} в структурах с $x=0,23$ и $0,32$ (1, 3 — в неотожжённых образцах; 2, 4 — в отожжённых образцах). Величина n_{77} сразу после НИО составляла около 10^{17} см^{-3} , и не зависела от x , что было вызвано, очевидно, присутствием в исходных структурах нейтральных дефектов, связанных с нановключениями Te. После релаксации величина n_{77} выходила на уровень $\sim(3-7)\cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$, что предполагало низкую концентрацию остаточных доноров. Что касается подвижности, то сразу после НИО она падала, что подтверждало формирование дополнительных центров рассеяния с концентрацией порядка 10^{17} см^{-3} , а после релаксации возрастала. При этом в образцах, не прошедших отжиг, она выходила на уровень, характерный для исходных структур, а в образцах, прошедших перед НИО отжиг, μ_{n77} приближалась к максимальным известным значениям, хотя и не достигала их. По-видимому, дополнительными центрами рассеяния в исходных

структурах являлись дефекты упаковки, исчезавшие в результате отжига, т.к. режим отжига, конвертировавшего образцы в p -тип проводимости, близок к режиму отжига, оптимизированного для аннигиляции подобных дефектов.

При исследовании оптических свойств структур было установлено, что типичные полуширины линий «краевой» ФЛ, ассоциируемой в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с рекомбинацией экситона, локализованного флуктуациями состава, составили при $T=4,2$ К от 7 до 12 мэВ, что свидетельствовало о хорошем структурном совершенстве выращенных образцов. Незначительный сдвиг максимума этой полосы в коротковолновую область, как и «края» пропускания при 300 К, после отжига, показал, что оптимизация условий выращивания гетероэпитаксиальных структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ на кремниевых подложках позволяет добиваться в них минимального нарушения дальнего порядка в кристаллической решётке, вызванного неравновесным характером МЛЭ.

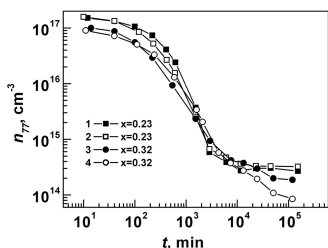


Рис. 1

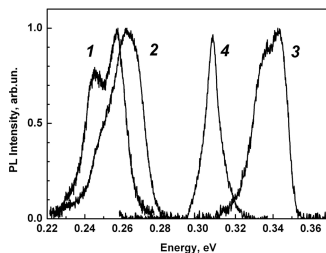


Рис. 2

Особенностью низкотемпературных ($4,2 < T < 100$ К) спектров ФЛ исследованных структур было наличие в них полос, связанных с акцепторными состояниями (Рис. 2, спектры 1, 2 и 3). Сопоставление результатов исследования электрических и оптических свойств структур и их сравнение со свойствами образцов, выращенных в той же системе МЛЭ и в тех же условиях, но на подложке из GaAs (спектр 4), показало, что появление акцепторных состояний в исследованных структурах связано со спецификой МЛЭ на подложке из Si. Совокупность полученных данных позволила предположить, что акцепторные состояния, проявляющиеся в электрических и оптических свойствах исследованных структур, связаны с захватом акцепторных примесей на дефекты на границах раздела (в том числе, дислокации и дефекты упаковки) $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{Si}$ в ходе МЛЭ.

Таким образом, показано, что для МЛЭ гетероэпитаксиальных структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенных на кремниевых подложках, характерно высокое структурное совершенство и низкая концентрация остаточных доноров. Повышенная концентрация остаточных акцепторов в таких структурах (по сравнению со структурами, выращенными в сходных условиях на подложках GaAs) предположительно связана с захватом акцепторных примесей на структурные дефекты, типичные для сильно рассогласованных по параметру кристаллической решетки гетероэпитаксиальных структур. Следует ожидать, что снижение плотности этих дефектов за счёт совершенствования технологии МЛЭ улучшит и электрические свойства структур.

Работа частично выполнена в рамках совместного российско-украинского проекта (грант РФФИ 11-02-90434 и ГФФИ Украины Ф40.2.65).

А39 Фоточувствительные структуры на основе наногетероструктур Si/Ge для оптических систем передачи информации

Войцеховский А.В., Коханенко А.П., Турапин А.М., Романов И.С., Лозовой К.А.

Томский государственный университет, Томск, Россия

В последние несколько лет наметились перспективы использования полупроводниковых материалов на основе германия в кремнии, содержащих кластеры Ge нанометровых размеров (квантовые точки), “встроенные” в матрицу Si, в оптоэлектронике. Появляются светоизлучающие и фотоприемные кремний-германиевые устройства, позволяющие кремниевой технологии успешно конкурировать с традиционно оптоэлектронными материалами, такими как соединения $A^{III}-B^V$. Повышение эффективности устройств на основе наногетероструктур Si с квантовыми точками (КТ) Ge возможно благодаря эффектам пространственного квантования. Для проявления этих эффектов геометрические размеры наноструктур должны составлять около 10 нм и менее. Кроме этого требуется максимально высокая плотность их массивов [1].

Одним из важнейших направлений развития единой системы связи (обработки и передачи информации) является разработка оптоволоконных линий передачи и фотонных приборов обвязки, работающих в окне прозрачности кварца вблизи длин волн 1,3 и 1,55 мкм. Представляется необходимым создание на одном чипе всего набора компонентов волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), в том числе светоизлучающих устройств и фотоприемников. Для уменьшения стоимости таких систем нужно, чтобы большее число компонент было выполнено на основе типовых методов кремниевой технологии.

В данной работе был проведен анализ возможности создания фотоприемников ИК диапазона на основе наногетероструктур с КТ Ge в Si. В работах [2, 3, 4, 5] были получены и исследованы фотодетекторы (ФД) для применения в ВОЛС. При длине волны $\lambda = 1,3$ мкм достигнута квантовая эффективность на уровне 1-4,2 %. Плотности темнового тока при смещении 1 В и комнатной температуре составляли 10^{-4} - 10^{-3} А/см², что существенно превышает токи как в кремниевых, так и в германиевых диодах.

В работе [6] авторы сообщают о создании Ge/Si ФД, содержащих в качестве активного элемента от 12 до 36 слоев КТ, выращенных с помощью метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на окисленной поверхности кремния при различных температурах. Увеличение квантовой эффективности было достигнуто за счет реализации волноводной структуры фотоприемника, использующей эффект полного внутреннего отражения света от стенок волновода. Фоточувствительные слои были сформированы на подложках кремний-на-изоляторе в виде латеральных волноводов, шириной 50 мкм, длина варьировалась от 100 мкм до 5 мм. Оказалось, что максимальная квантовая эффективность реализуется в структурах с длиной менее 3 мм при величине обратного смещения более 3 В и достигает значений 21 и 16 % для длин волн 1,3 и 1,55 мкм соответственно. Столь высокие значения квантовой эффективности получены за счет высокой плотности КТ Ge в активной области фотодетектора и эффекта многократного внутреннего отражения. В работе [7] в аналогичных структурах были достигнуты значения чувствительности 1,2 А/Вт на длине волны 1,55 мкм.

По результатам проведенного обзора можно сделать вывод, что для реализации преимуществ ФД с КТ над системами большей размерности необходимо уменьшать размеры квантовых точек до величин менее 10 нм и одновременно увеличивать слоевую плотность КТ с тем, чтобы добиться минимальных значений темнового тока без потери квантовой эффективности фотопреобразования. Если сравнить разные типы

фотодетекторов: фотодиоды, фототранзисторы и волноводные фотодиоды, то наибольшая квантовая эффективность достигается в волноводных исполнениях, за счет более полного поглощения падающего излучения.

В работе приводятся результаты расчёта зависимости параметров самоорганизующегося массива КТ Ge на поверхности Si(001) от условий роста на основе кинетической модели. Поскольку в процессе роста островки образуются самопроизвольно, то управлять их морфологией можно только изменяя условия синтеза: температуру подложки, скорость напыления, количество напылённого материала. Кроме того, заметно отличаются по своим характеристикам массивы германиевых кластеров, выращенных на поверхностях с различной кристаллографической ориентацией, на предварительно окисленной поверхности кремния. К дополнительным способам управления параметрами системы можно также отнести использование сурфактантов и литографии, а также радиационное воздействие на структуру.

Из анализа литературных данных по проблеме роста квантовых точек германия на кремнии методом МЛЭ был сделан вывод о том, что наиболее подходящей для описания различных стадий ростового процесса является кинетическая модель, предложенная в работе [8]. При известных параметрах гетероэпитаксиальной системы, которые частично могут выбираться из сопоставления с экспериментом, эта модель позволяет рассчитывать функцию распределения КТ по размерам и поверхностную плотность КТ. Она также позволяет объяснить наблюдаемые в эксперименте зависимости среднего латерального размера и плотности КТ от температуры роста, скорости осаждения и толщины осаждения.

В ходе работы была изучена динамика процессов на начальных стадиях роста КТ, составлена программа для расчета характеристик ансамбля КТ, проведено компьютерное моделирование и вычислительные эксперименты по определению зависимости параметров гетероэпитаксиальной системы от условий роста. При этом была учтена температурная зависимость коэффициента диффузии Ge на поверхности Si. На базе проведённых оценок определялись условия синтеза для получения массива КТ Ge с заданными параметрами. Синтез структур проводился на установке МЛЭ «КАТУНЬ-100». В результате проведения ростовых экспериментов достигнута плотность островков Ge более 10^{11} см⁻². Исследование поверхности полученных образцов осуществлялось с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) NT-MDT SOLVER. Получено АСМ изображение образца, выращенного при $T=350^{\circ}\text{C}$ и скорости осаждения $V=0,45$ МС/с (монослоев в секунду). Толщина напыленного Ge составила 6 МС. Полученные результаты синтеза хорошо согласуются с используемым методом расчета параметров самоорганизующихся КТ Ge.

Зная морфологию нанокластеров, то есть функцию плотности их распределения по размерам, поверхностную плотность островков можно рассчитать энергетический спектр электрона, волновые функции электрона в квантовой точке, а затем и коэффициент поглощения и его спектр. И наоборот, для того чтобы создать структуры, обладающие максимумом поглощения в областях 1,3 и 1,55 мкм, можно рассчитать необходимый для этого средний размер квантовых точек, и, исходя из этого, определить оптимальные для получения подобных структур условия роста методом МЛЭ.

Предложено также использование многослойных брэгговских отражателей на основе материальной системы Si/Ge для создания резонатора на длины волн $\lambda=1,3$ мкм и $\lambda=1,55$ мкм для повышения поглощенной оптической мощности.

Литература

1. Kang L. et al. // Proc. of the IEEE. – 2007– V. 95. – № 9. – p. 1866-1882.

2. Elcurdi M. et al. // Appl. Phys. Lett. – 2002. – v. 80 – № 3. – p. 509-511.
3. Tong S. et al. // Appl. Phys. Lett. – 2002. – v. 80. – № 7. – p. 1189-1191.
4. Masini G. et al. // Appl. Phys. Lett. – 2003. – v. 82. – № 15. – p. 2524-2526.
5. Elving A. et al. // Physica E. – 2003. – v. 16. – p. 528-532.
6. Якимов А.И. и др. // ФТТ. – 2005. – Т. 47. – № 1. – С. 37-40.
7. M.Morse et al. // Proc. of SPIE. – 2008. – Vol. 6996.
8. Дубровский В. Г. // ФТП. – 2006. – Т. 40. – № 10. – С. 1153-1160.

А40 Исследование схемы накопления и считывания фотосигнала матричных инфракрасных фотоприемников с построчным накоплением

^{1,2}Болтарь К.О., ^{1,2}Каракозов Ю.С., ¹Полунеев В.В.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

Для создания тепловизионных и тепlopеленгационных систем в настоящее время широко используются матричные фотоприемные устройства (МФПУ) второго и третьего поколений, которые регистрируют тепловое излучение объектов, его пространственное распределение и имеют высокую информативность.

Такие фотоприемники состоят из фоточувствительного слоя, разделенного на отдельные фоточувствительные элементы (ФЧЭ), и электрически связанной с каждым ФЧЭ большой интегральной схемы (БИС) считывания и первичной обработки сигналов, которые формируются отдельными элементами при их облучении ИК-излучением. БИС считывания содержит накопительные ячейки, предварительные усилители, схемы выборки и хранения сигналов на время их считывания, а также мультиплексор, который необходим для уплотнения сигналов во времени, чтобы свести к минимуму число выходов из холодной зоны ФПУ. От характеристик БИС считывания в значительной степени зависит качество фотоприемных устройств.

Симуляция схемы при помощи SPICE-подобных программ является принятым в индустрии полупроводникового производства способом верификации работы схемы на транзисторном уровне перед её реализацией.

В работе разработана модель электрической схемы канала секции накопления БИС считывания, исследована работа схемы накопления и считывания сигналов МФПУ посредством математического моделирования с помощью программного пакета схемотехнического моделирования в формате SPICE. Исследовано влияние пульсаций управляющих и питающих напряжений на выходной сигнал. Проведен анализ эффектов, связанных с наличием паразитных компонентов топологии БИС считывания и экспериментальные исследования, подтверждающие достоверность результатов расчета и моделирования. Показано, что уменьшение динамического диапазона выходного сигнала в 1,8-2,5 раза обусловлено малой крутизной выходного транзисторного каскада секции накопления, изготовленного по *n*-МОП технологии.

Объяснен обнаруженный ранее экспериментально дополнительный шум многоядных фотоприемных устройств, работающих в режиме временной задержки и накопления, возникающий при неравномерном движении сканирующего устройства и предложен метод его устранения.

Показано, что наибольший вклад в пульсации выходного сигнала дает нестабильность напряжения смещения подпорогового транзистора. При уменьшении дифференциального сопротивления фотодиода от 8 до 1 МОм коэффициент передачи пульсации напряжения смещения подпорогового транзистора в выходной сигнал увеличивается от 0,65 до 4,82.

Полученные результаты позволяют оценить эффективность работы секции накопления и разработать направления модернизации БИС считывания фотоприемного устройства для улучшения его работы.

Литература

1. Бовина Л.А. [и др.]. Матричные фотоприемники формата 128x128 и 384x288 на основе фотодиодов из $Cd_xHg_{1-x}Te$ // Прикладная физика. - 1999. - № 3. - С. 32-41.
2. Филиппов С.Н., Болтарь К.О. Исследование механизмов переноса заряда в фотодиодах на основе эпитаксиальных слоев $CdHgTe$. // Труды МФТИ. - 2010. - Том 2, № 1. - С. 52-66.
3. Vasilyev V.V. [et al]. MCT heteroepitaxial 4x288 FPA // Infrared Physics & Technology. - 2004. - № 45. - P.13-23.

A41 Нестационарная фотопроводимость пористого кремния

Монастырский Л.С., Соколовский Б.С., Павлык М.Р., Аксиментьева Е.И.

Львовский национальный университет им. Ивана Франко, Львов, Украина

На сегодняшний день остро стоит проблема контроля токсичных и других вредных веществ в воздушной атмосфере, воде, продуктах питания. В связи с этим возникает необходимость в разработке микроэлектронных систем детектирования газов для промышленных, офисных и жилых помещений, которые могут быть компонентами интегральных систем защиты жизни и здоровья человека. Особый интерес представляют сенсоры на основе нанопористых полупроводников, в частности, пористого кремния. Среди таких сенсоров можно выделить фоточувствительные структуры из пористого кремния, основанные на изменении фотопроводимости и ее кинетики под действием различных газовых сред и могут использоваться как эффективные газоанализаторы. Для проектирования таких сенсоров необходимо знать зависимости фотопроводимости и ее кинетики от свойств поверхности пористого кремния, которые определяются типом газовой среды, радиуса пор и среднего расстояния между ними.

В работе представлена новая физико-математическая модель нестационарной фотопроводимости пористого кремния, в которой учитывается рекомбинация фотоносителей на поверхности цилиндрических пор при синусоидальном освещении. Предполагается однородная генерация фотоносителей и диффузионный характер их движения.

Рассмотрена модель полупроводника p -типа, в котором равномерно распределены цилиндрические поры радиуса r_0 , а среднее расстояние между центрами пор равно $2R$. Вследствие повышенной рекомбинации носителей на поверхностях пор в полупроводнике устанавливается неоднородное распределение фотоносителей и имеет место биполярная диффузия фотоносителей к порам.

Характер фототовета зависит от геометрии пор, скорости поверхностной рекомбинации фотоносителей. Последняя определяется состоянием поверхности и зависит как от концентрации молекул газа, так и от дипольного момента адсорбированных молекул.

Методом конечных элементов нами рассчитана зависимость фотопроводимости пористого кремния с цилиндрической симметрией пор при синусоидальном изменении интенсивности падающего света как функции скорости поверхностной рекомбинации фотоносителей, радиуса пор и расстояния между ними. Показано, что частота

возбуждения, при которой значение фотопроводимости уменьшается вдвое, зависит как от концентрации адсорбируемого газа, так и от природы адсорбата.

А42 Получение напряженных гетероструктур на основе CdHgTe методом ионной имплантации

Удовицкая Р.С., Смирнов А.Б., Савкина Р.К., Сизов Ф.Ф.

Институт физики полупроводников НАН, Киев, Украина

Ионная имплантация широко применяется для изготовления ИК-фотодиодов на основе твердых растворов CdHgTe (КРТ) [1]. Целью работы было изучение влияния неориентированного низкоэнергетического облучения ионами бора B^+ и серебра Ag^+ на свойства гетероэпитаксиальных структур CdHgTe/CdZnTe. Освещение этого вопроса представляется своевременным и важным для развития систем ИК видения на базе гетероструктур КРТ диапазонов $(3 \div 5)$ и $(8 \div 12)$ мкм. В данной работе рассматривается состояние поверхности, оптические и электрические свойства полупроводниковых гетероструктур $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te/CdZnTe}$ ($x \sim 0,223$), которые были получены методом жидкофазной эпитаксии и подвергались неориентированному облучению ионами B^+ и Ag^+ со стороны КРТ на имплантаторе «Везувий-5». Энергия и доза имплантации составляли 100 кэВ и $Q=3 \cdot 10^{13}$ см² соответственно. После имплантации образцы подвергались низкотемпературным отжигам (5 часов, 75°C) в атмосфере Ag^+ при избыточном давлении 4 Бар.

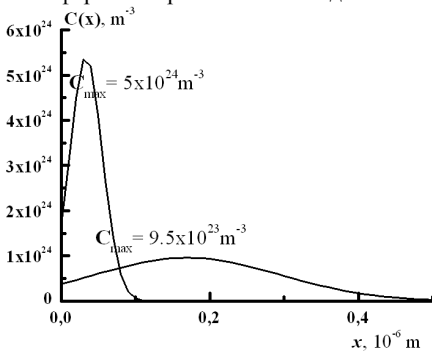


Рис 1 Профили распределения примеси B^+ и Ag^+ в пленке $Cd_xHg_{1-x}Te$ на подложке $CdZnTe$ ($x \sim 0,223$)

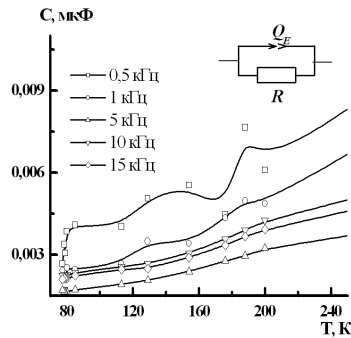


Рис 2 Температурная зависимость емкости образца гетероэпитаксиальной структуры $Cd_xHg_{1-x}Te/CdZnTe$ ($x \sim 0,223$). На вставке: электрическая схема исследуемой гетероструктуры

Значения концентрации и подвижности основных носителей заряда определялись по методу Ван-дер Пау при $T = (78 \div 300)$ К в области магнитных полей $(0,05 \div 0,7)$ Тл. Обработка экспериментальных магнитопольевых зависимостей коэффициента Холла R_H и проводимости σ показала, что в исходном состоянии пленка КРТ имеет n -тип проводимости. Причем, обнаружено присутствие двух типов носителей - «тяжелых» ($n_1 = 4,0 \cdot 10^{21}$ м⁻³, $\mu_{n1} = 0,322$ м²·В⁻¹·с⁻¹) и «легких» ($n_2 = 5,0 \cdot 10^{18}$ м⁻³, $\mu_{n2} = 8,0$ м²·В⁻¹·с⁻¹) электронов. Имплантация и отжиг образца привели к росту концентрации «тяжелых» электронов (до $n \sim 5 \cdot 10^{22}$ м⁻³) и незначительному уменьшению их подвижности. Вклад «легких» электронов не обнаружен.

Параметры	V^+	Ag^+
R_p , мкм	0,17	0,024
σ , Па	$4 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$
C_p , м ⁻³	$9,5 \cdot 10^{23}$	$5 \cdot 10^{24}$

Рассчитаны профили распределения бора и серебра (Рис 1) в проимплантированной структуре, определена величина коэффициента сжатия ($\beta \sim 3 \cdot 10^{-31} \text{ м}^3$) кристаллической решетки твердого раствора

$CdHgTe$, а также максимальное значение величины механических напряжений для ионов V^+ $\sigma_{\text{макс}} \sim 4 \cdot 10^4 \text{ Па}$ и Ag^+ $\sigma_{\text{макс}} \sim 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ в области радиационного разупорядочения, обусловленные низкоэнергетическим облучением ионами бора. (Таблица 1) На Рис. 2 изображена температурная зависимость в диапазоне частот ($10 \div 10^5$) Гц, полученная на прецизионном измерителе импеданса LCR-819 в температурном интервале ($78 \div 300$) К, на вставке приведена эквивалентная электрическая схема исследуемой гетероструктуры. Принимая во внимание неидеальное поведение границы раздела для описания резистивно-емкостных свойств изучаемой гетеросистемы, емкостной элемент представлен элементом с постоянной фазой (CPE – constant phase element) [2], обозначенный на рисунке символом Q_E . Импеданс этого элемента описывается соотношением: $Z_{QE} = (A_0 \cdot (j\omega)^n)^{-1}$, где A_0 – частотно-независимый множитель; ω – круговая частота; n – показатель степени, определяющей характер частотной зависимости ($-1 \leq n \leq 1$) и неидеальности такого конденсатора.

Литература:

1. Сеница С.П., Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона, Новосибирск.: Наука, - 2001. - 375 с.
2. Стойнов З.Б., Графов Б.М., Савова-Стойнова Б., Елкин В.В., Электрохимический импеданс, М.: Наука, 1991. - 336 с.

А43 Релаксация электрофизических параметров n -слоев в МЛЭ эпитаксиальных пленках $p\text{-}Cd_xHg_{1-x}\text{Te}$, сформированных ионной имплантацией и ионным травлением

¹ Ижнин И.И., ¹ Фицыч Е.И., ² Бончик А.Ю., ² Савицкий Г.В., ³ Войцеховский А.В., ⁴ Дворецкий С.А., ⁴ Михайлов Н.Н., ⁴ Сидоров Ю.Г., ⁴ Варавин В.С., ⁵ Мынбаев К.Д.

¹ Научно-производственное предприятие «Карат», Львов, Украина

² Институт прикладных проблем механики и математики НАН, Львов, Украина

³ Томский государственный университет, Томск, Россия

⁴ Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

⁵ ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Для формирования p - n переходов фотодиодов в $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) сегодня преимущественно используют методы ионной имплантации (ИИ) и ионного травления (ИТ). В основе этих процессов лежит взаимодействие энергетических ионов с кристаллической решеткой КРТ, формирование первичных дефектов (преимущественно в подрешетке Hg) и образование вторичных дефектов в процессе диффузии междоузельной ртути (Hg_i) и взаимодействию с другими точечными и протяженными дефектами. Различие между этими методами обусловлено разным характером формирования первичных дефектов из-за отличий в энергиях ионов. Хорошо известно, что при ИТ (низкоэнергетические ионы) формируется источник диффузии Hg_i чрезвычайно высокой концентрации. Поэтому взаимодействие различных дефектов с Hg_i , происходящее при ИТ в сильно неравновесных условиях (гигантском пересыщении кристалла Hg_i), приводит к образованию нестабильных

донорных комплексов и центров. После ИТ эти донорные дефекты распадаются, приводя к сильной релаксации электрических параметров модифицированного слоя КРТ даже при комнатной температуре. О релаксации электрических параметров ионно-имплантированных слоев КРТ информация отсутствует. В данной работе предпринята попытка восполнить этот пробел.

Сравнительные эксперименты проведены на номинально нелегированных эпитаксиальных пленках $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs (013), с составом активной области $x_a \approx 0,22$ (толщиной ~ 10 мкм) и составом градиентного защитного слоя у поверхности $x_g \approx 0,45$ (толщиной $\sim 0,5$ мкм). Пленки вакансионного p -типа проводимости получали термическим отжигом в атмосфере гелия послеростовых пленок n -типа, концентрация дырок составляла $p(77)$ (77 К) $\sim 8 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$. Ионная имплантация образца проведена ионами Si^+ при следующих режимах: энергия ионов $E=50$ кэВ; ток $I=1$ мкА; плотность тока ионов $j=0,01$ мкА/см 2 ; флюенс ионов $\Phi=10^{14}$ см $^{-2}$. Специального охлаждения держателя образцов в установке ИИ не было. Послеимплантационный отжиг не проводился. Ионное травление проведено в Ag^+ плазме постоянного тока при следующих режимах: энергия ионов $E=0,5$ кэВ; плотность тока ионов $j=0,1$ мкА/см 2 ; время 20 мин., флюенс ионов $\Phi=7,5 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$. После ИИ и ИТ исследовали релаксацию электрических параметров образца в процессе его хранения (старения) при комнатной температуре (19 ± 2 °С) путем измерения полевых зависимостей ($B=0,01\text{-}1,5$ Тл) коэффициента Холла $R_H(B)$ и удельного сопротивления $\rho(B)$ при 77 К через определенные промежутки времени и их анализа методом дискретных спектров подвижности (DMSA).

Результаты измерений электрических характеристик образцов в процессе старения при комнатной температуре (19 ± 2 °С) представлены на рис.1. После ИИ и ИТ для всех времен релаксации коэффициент Холла во всем диапазоне исследованных магнитных полей был отрицательным, что свидетельствует об образовании в процессе ИТ и ИИ слоя n -типа проводимости определенной толщины. Вид полевых зависимостей (наличие перегиба в полях порядка 0,1-0,3 Тл) свидетельствовал о наличии в конвертированном n -слое электронов с высокой и низкой подвижностью и возможно об образовании некой n^+-n структуры. По мере увеличения времени старения форма первичной огибающей спектров подвижности меняется незначительно, что свидетельствует о сохранении структуры носителей.

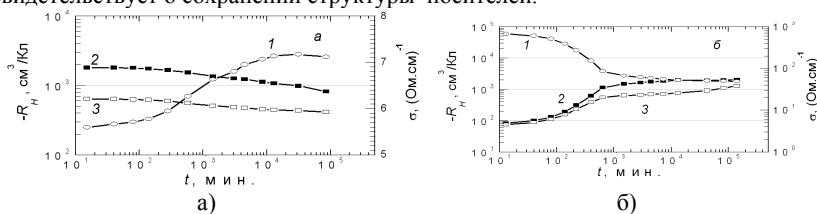


Рис. 1. Временные зависимости интегральных значений проводимости (I) и коэффициента Холла (2 - 0,05 Тл, 3 - 1 Тл, $R_H < 0$) при 77 К в процессе старения при комнатной температуре: а - для образца #1 после ИИ; б - для образца #2 после ИТ.

Принципиально различным был характер релаксационных кривых проводимости и коэффициента Холла для конвертированных ИИ и ИТ слоев.

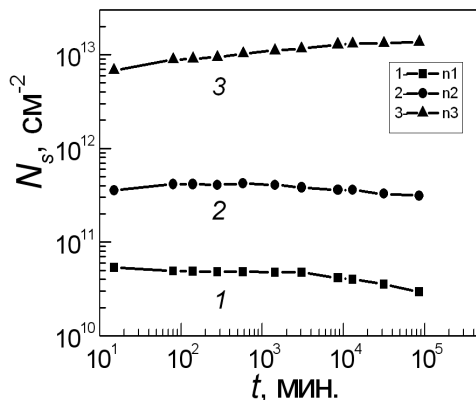


Рис. 2. Временные изменения слоевой концентрации N_{si} электронов с подвижностью μ_{n1} (1), μ_{n2} (2) и μ_{n3} (3) при 77 К для образца #1 после ИИ в процессе релаксации

Основное внимание сосредоточим на свойствах ИИ слоя, т.к. для ИТ слоев они были изучены ранее. По данным DMSA в конвертированном ионной имплантацией n -слое присутствуют три типа электронов: с высокой подвижностью μ_{n1} порядка $73000\text{--}80000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, низкой подвижностью μ_{n2} порядка $12000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и еще более низкой подвижностью μ_{n3} порядка $2700 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. При этом основной вклад в проводимость дают электроны с наиболее низкой подвижностью μ_{n3} , и наиболее высокой слоевой концентрацией, который превышает вклад остальных электронов приблизительно в 5 раз (рис. 2). Обсуждается вероятная природа образованных ИИ донорных центров.

Работа частично выполнена в рамках совместного российско–украинского проекта (грант РФФИ 11-02-90434 и ГФФИ Украины Ф40.2.65).

A44 Влияние слоя пассивации на работу сенсорных приборов с активным элементом на основе CdHgTe

Вуйчик Н.В., Цибрий З.Ф., Билевич Е.О., Евменова А.З., Лученко А.И., Свеженцова К.В., Сизов Ф.Ф.

Институт физики полупроводников НАН, Киев, Украина

Свойства фотоприемников ИК спектра, в том числе с использованием CdHgTe, существенно зависят от химической и электронной структуры поверхности. Поэтому, при изготовлении фотоприемников на основе CdHgTe необходимо образование защитных слоев на его поверхности, которые бы выдерживали термоудары при переходе к разным температурам (вплоть к температуре жидкого азота), блокировали деградацию структуры и уменьшали поверхностные токи. Создание такого защитного слоя возможно как при выращивании структуры (метод МЛЭ) [1], так и при дополнительном выращивании диэлектрического слоя на поверхности CdHgTe.

Нами реализуется второй случай – в работе [2] мы сообщали о разработке методики выращивания пассивационного слоя CdTe на поверхности CdHgTe, который позволяет уйти от проблемы перегрева структуры. В данном случае речь идет о температурах, при которых не наступает деградация структуры CdHgTe.

Толщины осажденных пленок CdTe определялись температурными и другими технологическими режимами роста пленок и контролировались при помощи

эллипсоидности. Время напыления варьировалось в пределах 6-8 мин. Для исследования морфологии поверхности структур использовался сканирующий зондовый атомно-силовой микроскоп «ФемтоСкан». Измерения проводились в режиме контактного атомно-силового микроскопа с использованием в качестве зонда кремниевых кантиллеров, гнушейся пластины с закрепленным острием на ее конце. На рис. 1 показано трехмерное изображение морфологии поверхности тонкой пленки CdTe толщиной 75-80 нм, выращенной на поверхности CdHgTe. В нашем случае сформированные пленки теллурида кадмия имели мелкозернистую поликристаллическую структуру. Именно такая пассивационная поверхность и необходима с целью уменьшения поверхностных токов утечки. Характерной особенностью для всех пленок является тот факт, что под микрорельефом поверхности пленки наблюдается микрорельеф подложки, что свидетельствует о повторении пленкой топологии поверхности подложки.

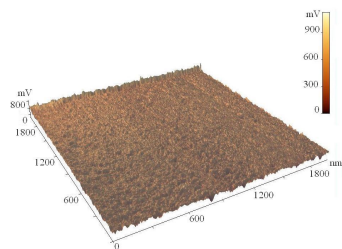


Рис. 1. Морфология поверхности пленки CdTe, выращенной на поверхности структуры CdHgTe/CdZnTe.

В тоже время, экспериментально было показано, что при определенных толщинах пассивирующего покрытия возможен, так называемый эффект просветления. Этот эффект, создаваемый тонкой пленкой теллурида кадмия, является результатом интерференции света, который отражается от верхней и нижней границ напыленной пленки. В конечном итоге это приводит к усилению интенсивности пропускания света, что должно сказаться на работе приемника ИК излучения в лучшую сторону. Оптические исследования в диапазоне спектра 1,3-25 мкм проведены на ИК-Фурье спектрометре „Perkin Elmer” Spectrum ВХII и фиксировались с помощью CCD-камеры. Так как площадь образцов была 17x17 мм², то во избежание случайного результата в локальной точке образца, ИК измерения проводилось в нескольких точках структуры с разрешением 1 см⁻¹. Исходя из исследований спектров пропускания эпитаксиальных пленок Cd_xHg_{1-x}Te/CdZnTe с нанесенным защитным покрытием CdTe толщиной 75-80 нм показано, что величина пропускания в структурах с CdTe увеличивается на 3-5% в сравнении с пропусканием исходной структуры (рис.2а). Иными словами, уменьшается отражение падающего на структуру излучения и создается ахроматический просветляющий эффект. Однако при толщине защитного покрытия CdTe 45-50 нм, такой эффект не наблюдается (рис.2б).

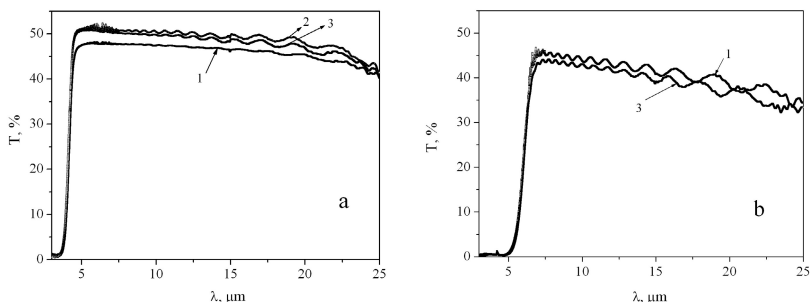


Рис. 2. Спектральные зависимости ИК-пропускания исходных (кривые 1) гетероструктур CdHgTe/CdZnTe и с осажденным на них пассивационным покрытием CdTe при фронтальном освещении (кривые 3) и освещении со стороны подложки CdZnTe (кривая 2).

Таким образом, в нашей работе были установлены толщины слоя пассивации, при которых наблюдается эффект просветления структуры, проведены эллипсометрические измерения и рассчитаны показатели преломления и поглощения пленки CdTe, исследованы морфология поверхности получаемых пленок с помощью атомно-силовой микроскопии, исследованы спектры пропускания и отражения структур при различных толщинах защитного слоя. Показано, что в зависимости от толщины защитного слоя CdTe возможно как усиление, так и ослабление интенсивности света.

[1] Вирт И.С., Курило И.В., Рудый И.А., Сизов Ф.Ф., Михайлов Н.Н., Смирнов Р.Н. *CdTe как пассивирующий слой в гетероструктуре CdTe/HgCdTe* // ФТП.-2008.- Т.42, №7.- С. 788-792.

[2] Андреева Е.В., Апатская М.В., Билевич Е.О., Вуйчик Н.В., Дарчук Л.А., Сарсембаева А.З., Сизов Ф.Ф., Цибрий З.Ф. *Формирование пассивационного покрытия на основе теллурида кадмия для ИК-фоточувствительной матрицы HgCdTe* // XIX Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения – Москва (Россия). – 2006. – С. 110.

А45 Стенд технологического контроля матричных модулей на основе антимонида индия

^{1,2} Болтарь К.О., ¹ Комаров Д.А., ¹ Пожидаев Д.А., ^{1,2} Соляков В.Н.,
^{1,2} Тренин Д.Ю., Шкондин М.А.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (ГУ), Долгопрудный, Россия

Производство матричных фотоприемных устройств является сложным, ресурсоемким и высокотехнологичным процессом. Межоперационный контроль при этом является не только необходимой, но и одной из самых важных составляющих этого процесса. Технологический контроль позволяет проводить выявление некачественной продукции на ранних этапах производства и извлечение ее из технологического процесса, документирование эволюции параметров изготавливаемого изделия с целью дальнейшего выявления причин, их анализа и устранения. Это приводит к постоянному совершенствованию технологии и улучшению качества выпускаемой продукции.

Для унификации процессов контроля, был разработан стенд технологического контроля модулей матричных. Стенд предназначен для технологического контроля путем проверки функционирования фотоприемных узлов матричных модулей на основе антимионида индия на различных этапах изготовления без охлаждения матрицы чувствительных элементов. Стенд состоит из держателя для крепления модулей (4), блока сопряжения (2) с модулем цифровой обработки (3), который через модуль преобразования уровней (1) сопрягается с персональным компьютером (рисунок 1).

Специальное программное обеспечение позволяет проводить определение количества неработающих чувствительных элементов, фиксирование величины напряжения смещения, приложенного к фотодиодам, протоколирование результатов контроля и их сохранение (рисунок 2).

Дальнейшее усовершенствование стенда предполагает полную автоматизацию процесса контроля с минимальным участием оператора. Это позволит исключить человеческий фактор в определении характеристик и сократит время, затрачиваемое на проведение контроля.

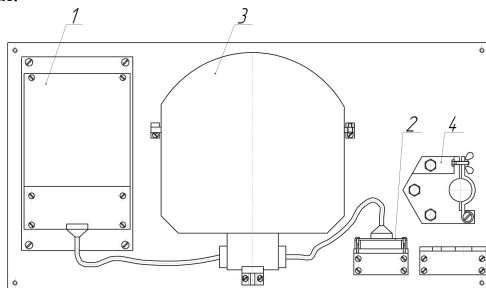


Рисунок 1. Внешний вид стенда технологического контроля модулей матричных. 1 – модуль преобразования уровней; 2 – блок сопряжения; 3 – модуль цифровой обработки; 4 – держатель.



Рисунок 2. Главное окно приложения

А46 Модель тепловых процессов в матрице фотоприемников в поле импульсного лазерного излучения

¹Средин В.Г., ²Куликов В.Б., ¹Сахаров М.В., ¹Васильева Ю.В.

¹ Военная академия РВСН им. Петра Великого; АНО НИЦ РКТ, Москва, Россия
² НПО «Циклон», Москва, Россия

Как правило, анализ процессов, протекающих в полупроводниковых кристаллах в поле импульсного лазерного излучения, проводят путем решения одномерного уравнения теплопроводности в применении к полубесконечной однородной среде [1]. В ряде работ в модель включают фазовый переход при достижении освещаемым материалом температуры плавления как дополнительный канал преобразования энергии [2]. Очевидно, что такая модель не может служить основой для анализа поведения матричного фотоприемника (МФП) в предполагаемых условиях. Расчет температурных полей в многослойных структурах, используемых для создания МФП на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, проведен в [3], однако в этой работе рассматриваются тепловые режимы функционирования матрицы, приводящие к изменению ее температуры в диапазоне $\Delta T \sim 10\text{K}$, что явно недостаточно для рассматриваемой задачи. В настоящей работе рассмотрены некоторые аспекты, позволяющие получить более реалистичскую модель.

Будем считать, что МФП освещается через подложку, изготовленную из материала, слабо поглощающего излучение во всем спектральном диапазоне, температура которой не изменяется существенным образом в течении всего процесса. МФП с помощью индиевых контактных столбиков соединен с матрицей кремниевого мультиплексора (МП). Последний располагается на посадочном месте, которое имеет постоянную температуру и может рассматриваться как среда с бесконечными теплоемкостью и теплопроводностью. Лазерное излучение равномерно освещает поверхность МФП. Величина энергии, поглощаемой и распространяющейся в описанной структуре имеет вид:

$$Q(z, t) = (1 - R_1(T))(1 - R(T))q(t)\alpha(z, T) \cdot e^{-\int_0^d \alpha(z', T) dz'} \quad (1)$$

где R и R_1 - коэффициенты отражения подложки и границы раздела чувствительный слой – подложка, α – полный коэффициент поглощения, включающий вклад нелинейного поглощения, T - температура. Полная энергия, выделившаяся в

МФП за время воздействия, $Q_{qm} = \int_0^t \int_0^z Q(z, t) dz dt$ приведет к возникновению электрического сигнала, выделению тепла в слое полупроводникового материала и вызовет в его объеме термоупругие напряжения. Энергию, связанную с электрическим сигналом, можно оценить величиной $m CU^2/2n$, где C – емкость выходных конденсаторов МФП, U - их напряжения пробоя, m и n – число строк и столбцов в матрице. С учетом значений C и U этой энергией можно пренебречь.

Тогда баланс энергии может быть представлен в виде:

$$\Delta Q_{qm} = \Delta Q_{ex} - \Delta Q_y - \Delta E \quad (2)$$

где ΔQ_{qm} - энергия, аккумулируемая в поглощающей области МФП в течение импульса лазерного излучения; ΔQ_{ex} - энергия, поглощаемая в МФП за то же время; ΔQ_y – часть поглощенной энергии, уходящая из фотоприемника в направлении МП, ΔE – термоупругая энергия нагретого лазерным излучением излучаемого слоя. Прямое численное решение (2) с граничными и начальными условиями, соответствующими конкретным

типам МФП достаточно громоздко, поэтому воспользуемся упрощенным видом решения уравнения теплопроводности [4]:

$$T(x,t) = C \cdot \exp(-q^2 at) \cdot \exp(\pm iqx) \quad (3)$$

В (3) экспоненциальные множители определяют временную и пространственную составляющие процесса установления температуры в среде, множитель $(q^2 a)^{-1}$ – постоянная τ , характеризующая время установления равновесного распределения температуры, q^{-1} – по порядку величины соответствует протяженности рассматриваемой среды, a выражается через термодинамические параметры материала. Оценки, проведенные с помощью (2,3) для МФП на структурах с квантовыми ямами на основе гетероструктур $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As} - \text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ показывают, что при плотности энергии полностью поглощаемого в структуре лазерного излучения около $3,5 \text{ Дж/см}^2$ температура индиевых контактов превысит 157°C , при 15 Дж/см^2 начнется разрушение фоточувствительного материала. Эти значения близки к результатам, полученных нами при облучении МФП указанного типа импульсами молекулярного лазера, генерирующего на смеси DF и DF- CO_2 [5].

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. по ГК № П389 от 11.05.2010 г.

Литература

1. Двуреченский А.В., Качурин Г.А., Нидаев Е.В., Смирнов А.С. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. М.: Наука, 1982г. - 248с.
2. С.П. Жвавый, Г.Л. Зыков. Численное моделирование динамических фазовых переходов в CdTe, иницированный наносекундным излучением эксимерного лазера. ФТП, т.40, № 6, с.652-655.
3. А.А. Мельников. Расчет температурных полей в многослойных фотоприемных структурах. Нано- и микросистемная техника. 2000, №2, с.21-26.
4. Н.С. Кошляков, Э.Б. Глинер, М.М. Смирнов – Основные дифференциальные уравнения математической физики, - ГИФМЛ, Москва, 1962 г.
5. В.Г. Средин, М.В. Сахаров, В.Б. Куликов, Г.К. Васильев, Б.В. Бравый. Исследования матричных фотоприемников на структурах с квантовыми ямами в условиях интенсивного оптического освещения. Изв. вузов. Материалы электронной техники. 2011, №1, с. 25-29.

A47 Приемники ТГц/суб-ТГц излучения на основе эпитаксиальных слоев CdHgTe с прямым детектированием сигнала

- ¹ Забудский В.В., ¹ Цибрий З.Ф., ¹ Сизов Ф.Ф., ¹ Апатская М.В., ¹ Бунчук С.Г.,
¹ Дмитрук Н.В., ¹ Смолий М.И., ² Михайлов Н.Н., ² Дворецкий С.А.

¹ *Институт физики полупроводников НАН, Киев, Украина*

² *Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия*

Терагерцовые технологии вызывают сейчас большой интерес и имеют множество потенциальных научных и коммерческих применений (например, для систем видения, спектроскопии, медицины, систем безопасности и т.д.). Для их реализации требуются относительно простые широкополосные детекторы с прямым детектированием сигнала, способные работать при комнатной температуре или при неглубоком ($T \sim 80 \text{ K}$) охлаждении [1]. Существует множество различных типов ТГц/суб-ТГц детекторов, наиболее чувствительные из которых

($NEP \sim 10^{-16}-10^{-19} \text{ W}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$) требуют глубокого охлаждения до криогенных температур. Большинство неохлаждаемых ТГц/суб-ТГц детекторов с прямым детектированием сигнала имеют относительно невысокую чувствительность ($NEP \sim 10^{-8}-10^{-9} \text{ Вт}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$) или не могут быть интегрированы в многоэлементные матрицы, например, для систем видения в реальном режиме времени. Целью наших исследований была разработка неохлаждаемых или слабоохлаждаемых и относительно быстродействующих детекторов с прямым детектированием сигнала на основе узкощелевого полупроводника $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ), который широко применяется для производства крупноформатных ИК матриц, и которые могут быть интегрированы со схемами считывания сигнала.

Нами рассмотрена возможность использования детекторов на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \sim 0,2 \div 0,32$) в ТГц/суб-ТГц области спектра. Базовым материалом для создания детекторов служили слои, выращенные методом жидкофазной или молекулярно-лучевой эпитаксии. Была разработана конструкция и технологический маршрут изготовления таких структур, а также была проверена их чувствительность к излучению в частотном диапазоне $\nu = 0,037-1,54 \text{ ТГц}$ при разных температурах и токах смещения.

Экспериментально и теоретически исследовано влияние различных электрофизических характеристик исходных пленок $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ на параметры ТГц/суб-ТГц детекторов на их основе. Было установлено, что детекторы, изготовленные на основе p -типа КРТ, обладают лучшей чувствительностью в сравнении с n -типом (рис. 1), а максимум их чувствительности при больших концентрациях носителей и больших значениях x смещается в сторону более высоких температур.

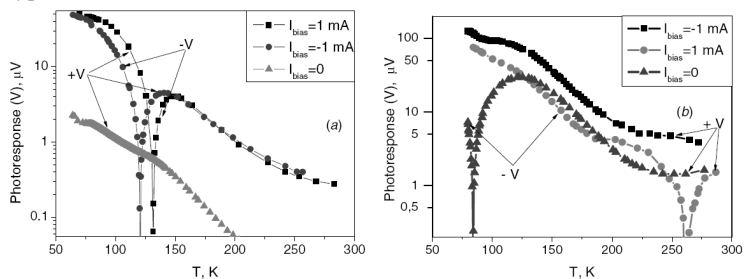


Рис. 1. Фотоответ болометров на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ n -типа (а) и p -типа (б) проводимости как функция от температуры. Частота излучения 78 ГГц, $+V$ и $-V$ обозначает положительное и отрицательное значение напряжения фотоответа, соответственно.

Рисунок 2 демонстрирует экспериментальные температурные зависимости фотоответа болометров, изготовленных на основе эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с разной концентрацией дырок и составом. Показано, что при $T=77 \text{ К}$ для достижения максимума выходного сигнала концентрация носителей и для p - и для n -типов проводимости должна быть невысокой, в то время как при $T=300 \text{ К}$ максимум выходного сигнала для p -типа наблюдался в детекторах с $p \sim (1-3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при $x \sim 0,3$ и выше. При $T=77 \text{ К}$ исходный сигнал слабо зависит от x для n -типа проводимости, а для p -типа проводимости сигнал тем больше, чем меньше x .

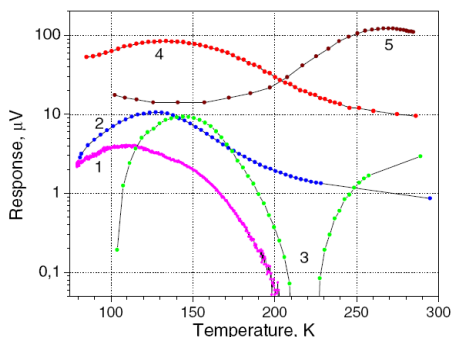


Рис. 2. Экспериментальные значения напряжения ответа в зависимости от температуры p -типа КРТ болометров (параметры образцов приведены ниже). Частота падающего излучения $\nu = 78$ ГГц.

Sample	1	2	3	4	5
Concentration	$p \sim 3.6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$p \sim 7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$p \sim 9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$p \sim 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$p \sim 1.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
x	0.226	0.22	0.22	0.22	0.305

Таким образом, изменяя химический состав, тип проводимости и концентрацию носителей КРТ, можно управлять такими характеристиками, как рабочая температура и выходной сигнал, а соответственно, вольт-ваттной чувствительностью детектора.

[1] Sizov F 2010 THz radiation sensors *Opto-Electron. Rev.* **18** 10–36.

A48 Программное обеспечение для стенда наладки формирователей сигналов изображений

^{1,2} Козлов К.В., ^{1,2} Соляков В.Н., ¹ Тетерин И.И., ^{1,2} Тренин Д.Ю.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (ГУ), Долгопрудный, Россия

При заводской наладке модулей цифровой обработки матричных фотоприемных устройств ИК диапазона (МФПУ) стоит задача селекции и корректирования дефектных элементов матрицы. Обычно для этой цели необходимо обработать и проанализировать большой объем данных (порядка 1000 кадров формата 320x256 элементов – более 80 миллионов чисел). Такой объем вычислений можно выполнить только с помощью специализированного программного обеспечения (ПО).

В ФГУП «НПО «Орион» было разработано программное обеспечение для стенда контроля и наладки формирователей сигналов изображений (ФСИ). Разработанная программа решает задачу анализа работоспособности чувствительных элементов МФПУ на основе InSb формата 320x256 элементов. Программа анализирует данные, представляющие собой массив оцифрованных сигналов чувствительных элементов при засветке матрицы излучением черного тела с фиксированной температурой.

Программное обеспечение имеет возможность работать с отдельными файлами калибровочных данных, с записанными в цифровом виде последовательностями тепловизионных кадров, или непосредственно с МФПУ, сопряженными с блоком

цифровой обработки. Это позволяет проводить оценку качества МФПУ, селекцию дефектных элементов, определение карт замещения элементов для различных устройств на основе InSb, выпускаемых на предприятии.

ПО позволяет классифицировать различные виды нечувствительных элементов (дефектов). Каждый тип дефекта отображается своим цветом на карте, что повышает удобство при анализе оператором. Настройки программы позволяют оператору выбирать палитру цветов отображения элементов. Возможность изменения масштаба позволяет наблюдать как общую карту элементов МФПУ, так и отдельно выбранные области (Рисунок 1). Также ПО позволяет отображать исходные данные в виде меняющейся последовательности кадров для визуального сопоставления полученной карты дефектных элементов с реальными значениями сигналов на матрице фотоприемника.

Программа имеет возможность производить расчет статистических характеристик до четвертого порядка (среднее значение, дисперсию, центральные моменты третьего и четвертого порядка) как по всем элементам матрицы, так и для каждого элемента. Эти статистики позволяют проводить оценку геометрических и временных характеристик МФПУ.

Математический аппарат, реализованный в приложении, позволяет строить гистограммы распределения сигналов по матрице чувствительных элементов, зависимости значения сигналов от времени для каждого элемента матрицы, распределение величины шума элементов по матрице.

Дальнейшее развитие разработанного ПО направлено на увеличение его функциональности и добавление возможности определения стабильности характеристик элементов во времени. Ведется работа по усовершенствованию имеющихся и разработке новых алгоритмов определения дефектных элементов МФПУ. Также возможна доработка программного обеспечения с целью анализа сигналов МФПУ на основе КРТ. Нарботки, полученные при разработке представленного программного обеспечения возможно применить в стендах автоматического контроля и измерения параметров МФПУ, разрабатываемых на предприятии.

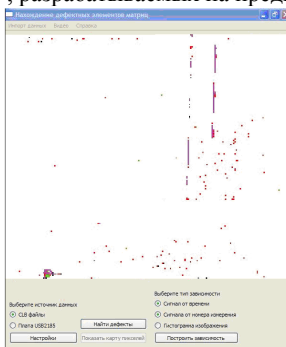


Рисунок 1. Пример области на карте дефектных элементов МФПУ.

А49 Широкопольный объектив на спектральный диапазон 3,5 - 10,5 мкм

Горелик Л.И., Полесский А.В., Хамидуллин К.А., Юдовская А.Д., Селиванов А.С.

ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

Одним из перспективных направлений повышения информативности и помехозащищенности оптико-электронных систем является возможность работы одновременно в двух спектральных диапазонах 3...5 и 8...12 мкм. Наиболее эффективным способом построения таких систем является использование в них двухдиапазонного матричного фотоприемного устройства.

Состояние разработок таких двухдиапазонных МФПУ в настоящее время в отечественной промышленности находится на начальном этапе. Для натурального моделирования работы двухдиапазонных систем, а так же разработки стендового оборудования для наладки и измерений характеристик перспективных двухдиапазонных МФПУ необходима разработка широкодиапазонных оптических трактов.

Одной из основных проблем такой разработки и особенно изготовления оптических трактов является слабая отработка широкополосного просветления с достаточной группой прочности. По этой причине были проведены исследования и найдено решение создания широкодиапазонного объектива, позволяющего при изготовлении обойтись без операции просветления, кроме того с целью понижения стоимости изготовления было осуществлено дополнительное условие – использование технологически хорошо отработанных материалов со сферическими поверхностями.

Разработанный и изготовленный объектив имеет следующие основные технические характеристики:

- фокусное расстояние, мм 62;
- относительное отверстие 1:2,5;
- спектральный диапазон работы, мкм 3,5...10,5;
- поле зрения (2ω , град) 11° ;
- рабочий отрезок, мм 41;
- Выходной зрачок находится на последней поверхности.

Объектив предполагается к использованию с перспективными двухдиапазонными матрицами формата 320x256 с шагом 30 мкм.

Расчетное качество разработанного объектива: 80% энергии пятна в площадке 35x35 мкм для диапазона 3...5 мкм, и не менее 75% для диапазона 8...12 мкм в площадке 40x40 мкм.

Расчетная концентрации энергии в пятне приведены на рисунке 1.

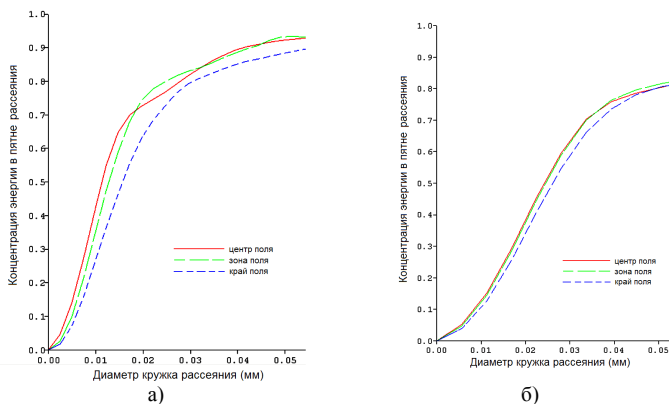


Рисунок 1. Концентрация энергии в пятне двухдиапазонного объектива в диапазонах (а) - 3...5 мкм, (б) - 8...12 мкм

Обеспечение достаточно высокого пропускания 64% без применения просветляющих покрытий было достигнуто за счет применения достаточно оригинальной комбинации материалов, из которых изготовлены сферические компоненты.

Внешний вид разработанного и изготовленного объектива приведен на рисунке 2.

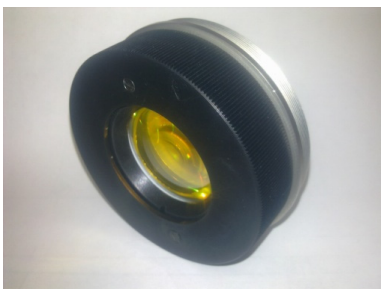


Рисунок 2. Широкодиапазонный объектив

Измеренные после сборки в диапазонах 3...5 и 8...12 мкм пятна рассеяния составляли: в диапазоне 8...12 мкм не более 64 мкм (измерения проводились на установке Ю-183 на длине волны 10,6 мкм), а в 3...5 мкм – 45 мкм (измерения проводились аналогичным методом в ФГУП «НПО «Орион» на установке созданной на базе оптической скамьи ОСК-2).

A50 Автоматизированный стенд для измерения основных параметров МФПУ на основе InSb

^{1,2} Козлов К.В., ¹ Лопухин А.А., ^{1,3} Сидорин А.В., ^{1,3} Тарабрин М.К., ^{1,2} Тренин Д.Ю.,
¹ Хамидуллин К.А., ¹ Шкетов А.И., ¹ Юдовская А.Д.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (ГУ), Долгопрудный, Россия

³ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В настоящее время в ФГУП «НПО «Орион», в связи с необходимостью серийного выпуска МФПУ, возникает необходимость уделять большое внимание метрологическому обеспечению производства и повышению производительности труда. В связи с этим, измерительное стендовое оборудование должно быть автоматизировано. Кроме того, измерительное стендовое оборудование должно быть унифицировано и обеспечивать измерение максимально возможного количества параметров на одном стенде.

Для решения этих задач был разработан и изготовлен автоматизированный стенд для измерения основных параметров МФПУ на основе InSb, который используется для измерения основных параметров серийно выпускаемых в ФГУП «НПО «Орион» изделий ФЭМ16М, ФЭМ17М и ФЭМ19М. Стенд может быть использован как на конечном этапе измерений, так и на различных стадиях их производства.

Разработанный стенд позволяет обеспечить измерение следующих основных характеристик:

- удельной обнаружительной способности D^* ;
- вольтовой чувствительности S_U ;
- эквивалентной шуму разницы температур NETD;
- числа нерабочих фоточувствительных элементов N.

Программное обеспечение стенда позволяет проводить статистическую обработку измеряемых характеристик.

Основные технические данные стенда приведены в таблице 1.

Таблица 1

Наименование параметра	Значение
Спектральный диапазон контролируемых МФПУ	3 – 5 мкм
Апертуры контролируемых МФПУ, не более	$\pm 15^\circ$
Размер диагонали контролируемых МФПУ, не более	12,3 мм
Диапазон температур АЧТ MICRON M360	323 – 1373 К
MICRON M345X6HR	278 – 333 К
Разрядность АЦП	14 бит
Формат контролируемых ФПУ, до	320x256

Конструкция стенда позволяет проводить измерения характеристик как самих МФПУ, так и формирователей сигналов изображения (ФСИ) на их основе, включающих в свой состав блоки сопряжения и цифровой обработки.

В качестве источников излучения в стенде применяются две модели абсолютно черного тела (АЧТ) – высокотемпературное АЧТ с точечной

диафрагмой MICRON M360 и низкотемпературное широкополостное АЧТ MICRON M345X6HR. Это позволяет проводить измерения как в соответствии с

существующей нормативной базой (ГОСТ 17772-88), так и согласно особым требованиям заказчика.

В состав стенда входят специально разработанный блок обработки информации и ПЭВМ с платой ввода, которые обеспечивают передачу и обработку сигнала. ПЭВМ оснащена специальным программным обеспечением, которое позволяет осуществлять сбор, обработку, а так же хранение и распечатку данных с помощью принтера.

Конструкция разработанного стенда позволяет осуществлять быструю, удобную установку и съем измеряемых изделий, стенд обслуживается одним оператором.

А51 Импульсный фотонный отжиг слоев InSb, имплантированных ионами Be^+

¹ Артамонов А.В., ¹ Астахов В.П., ¹ Карпов В.В., ² Максимов А.Д.

¹ *ОАО «Московский завод «Сапфир», Москва, Россия*

² *Московский гос. университет тонких химических технологий (ТУ), Россия*

Импульсный фотонный отжиг (ИФО) является перспективной альтернативой стационарному отжигу, применяемому в серийном производстве фотодиодов из InSb после имплантации ионов Be^+ , поскольку при таком отжиге исключается необходимость нанесения капсулирующей пленки SiO_2 , производимой с применением токсичного моносилана. Также исключается применение взрывоопасного водорода при отжиге.

Проведены исследования по определению наиболее эффективных режимов постимплантационного ИФО дефектов, введенных в InSb имплантацией ионов Be^+ , с применением излучения галогенных ламп. На установке ИФО «Оникс» в атмосфере аргона отжигались пластины InSb марки ИСЭ-2в с исходной концентрацией доноров $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, в которые проведена имплантация ионов Be^+ с энергией 30 кэВ и дозой $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Исследовалось влияние числа стадий отжига, температуры и длительностей стадий на эффективность отжига дефектов в имплантированном слое. Количественным параметром, определяющим эффективность отжига, являлось измеренные на слое знак и значение напряжения термо-э.д.с ($U_{\text{тэ.с}}$), из которого рассчитывалась концентрация носителей заряда.

Известно [1], что проявление р-типа проводимости в ионно-имплантированном слое бериллия в InSb при отжиге заключается не в сдвиге атомов Be из междоузельных позиций в позиции In, а в ликвидации радиационных дефектов донорного типа, обеспечивающих проводимость n-типа в имплантированном слое. Изучение результатов последовательного постадийного отжига серии образцов в диапазоне температур (200÷390)°С, при котором температура последующей стадии на 20÷40°С превышала температуру предыдущей, показало, что имеется 2 характерных диапазона температур отжига, в которых происходит резкий подъем значений $U_{\text{тэ.с}}$: $\Delta T_1 \sim 290\text{-}330^\circ\text{C}$ и $\Delta T_2 = 360\text{-}390^\circ\text{C}$. Из этого сделан вывод о наличии двух типов дефектов, обладающих разными энергиями связи. Для этих участков температур рассчитаны значения энергии активации отжига, составляющие $E_{a1} = 2,96 \text{ эВ}$ и $E_{a2} = 6,21 \text{ эВ}$, соответственно. Поскольку значение E_{a1} соответствует энергии активации движения вакансий In в кристаллах InSb [2], то это свидетельствует о том, что дефекты, отжигающиеся при более низких температурах ΔT_1 , представляют собой скопления вакансий In или дивакансии In, скорость исчезновения которых ограничена скоростью ухода вакансий In на стоки в кристалле или на поверхность. Интервал температур ΔT_2 соответствует отжигу, по-видимому, сложных ассоциатов точечных дефектов, в состав которых, как показали термодинамические расчеты, могут входить вакансии в

позициях In и атомы Be, In и Sb в междоузельных позициях. Исчезновение этих дефектов при отжиге ограничено скоростью развала ассоциатов.

Исходя из наличия двух типов дефектов исследовалась эффективность ИФО при одно-, двух- и трехстадийных режимах с разными температурами и длительностями стадий. Из результатов исследований следует, что наиболее эффективный отжиг происходит в двухстадийном режиме. При этом параметры отжига были следующими:

1-ая стадия: температура образца в импульсе $T_1=300-330^\circ\text{C}$ при длительности импульса $\tau_1=(40\div 120)$ с;

2-ая стадия: температура образца в импульсе $T_2=385-400^\circ\text{C}$ при длительности импульса $\tau_2=(10\div 20)$ с.

Эти результаты объясняются тем, что при двухстадийном режиме происходит независимый последовательный отжиг сначала скоплений вакансий и дивакансий, а затем ассоциатов, благодаря чему в каждый момент времени не создаются условия для образования новых ассоциатов из освобождающихся точечных дефектов, что, по видимому, происходит при одностадийном отжиге. При этом двухстадийный режим позволяет не только получить большее значение $U_{\text{мод}}$ и, соответственно, более эффективно отжечь дефекты, но и снизить температуру эффективного отжига. Эффективность двухстадийного режима ИФО на 60% выше, чем одностадийного, и на 25% - чем последовательного постадийного.

Литература

1.И.Г. Стоянова, Н.А. Скакун, А.С. Трохин. Локализация атомов бериллия в кристаллической решетке антимонида индия при ионной имплантации // Поверхность: Физика химия механика. 1988, №8, с.144–146.

2.N. Vaidya, H. Huang and D. Liang. Grown-in Defects of InSb Crystals: Models and Computation // Department of Mathematics & Statistics, York University. Toronto, Canada M3J 1P3, 2005. p. 9.

A52 Вакуумный стенд измерения теплофизических параметров крупноформатных фотоприемных устройств

Дражников Б.Н., Бычковский Я.С., Кондюшин И.С.

ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

Экспериментальные исследования и наземные испытания аппаратуры космического применения, являются важнейшей частью научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, подтверждающей качество и надежность оптико-электронной аппаратуры и ее составных частей. В ФГУП «НПО «Орион» ведутся работы по созданию технологии производства нового поколения крупноформатных фотоприемных устройств, предназначенных для широкопольной оптико-электронной аппаратуры космического базирования. Для проведения исследований и наземных испытаний фотоприемных устройств космического применения, разработан криовакуумный измерительный комплекс, предназначенный для исследования теплофизических характеристик и вакуумных испытаний фотоприемного устройства.

Измерение теплофизических параметров осуществляется по методу сведения энергетического баланса, с помощью уникального вакуумного комплекса проверки параметров крупноформатных фотоприемных устройств, структурная схема которого представлена на рисунке.

Установка выполнена по модульному принципу и состоит из:

- крупногабаритной вакуумной камеры, объемом $0,567 \text{ м}^3$, в которой располагается измеряемое изделие, оснащенной герморазъемами и гермоканалами для ввода-вывода электрических цепей и теплопроводов системы охлаждения теплового стыка фотоприемного устройства;
- системы охлаждения ФПУ, обеспечивающей охлаждение фотоприемника до $165 \pm 5 \text{ К}$
- системы терморегулирования, обеспечивающей установку температуры корпуса фотоприемника.
- системы откачки (безмасляный высоковакуумный откачной пост высокой производительности), давление не менее $10^{-3} \text{ мм.рт.ст.}$;
- имитатора фоновой засветки входных окон, с диапазоном температур фонового излучателя: от -20 до 50°C .
- системы сбора и обработки теплофизических характеристик, включающей датчики температуры, теплового потока и давления, для исследования теплофизических характеристик и испытаний их составных частей в условиях пониженного давления и вакуума, программные средства для обеспечения автоматизированных измерений температурных характеристик испытуемых изделий.

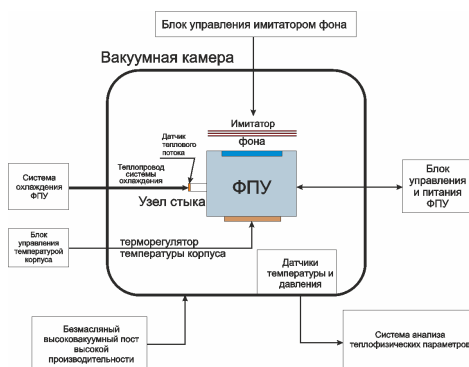


Рис. Блок схема стенда.

Измерение производится следующим образом:

Фотоприемное устройство располагается в вакуумной камере в экранно-вакуумной теплоизоляции, стыкуется с теплопроводами системы охлаждения и датчиком теплового потока, подключаются кабели электропитания. На фотоприемном устройстве закрепляются температурные датчики.

С помощью датчика теплового потока и метода сведения теплового баланса измеряется тепловая нагрузка на систему охлаждения, время выхода на рабочий режим, влияние фоновой нагрузки и др., а термодатчики позволяют определить распределение тепла по фотоприемному устройству в целом. Полученные результаты выводятся в виде протокола и могут быть представлены в виде компьютерной модели.

Вакуумно-криогенное оборудование позволяет производить экспериментальные исследования и контроль качества производства в условиях разряджения и температуры, имитирующим работу в космическом пространстве в масштабах лаборатории или научного центра, и является необходимым для разработки устройств, к которым предъявляются особые требования надежности и безотказности.

Литература:

1.А.Иванов. Замкнутый космос на производстве. Технологии в электронной промышленности, №6'2011

А53 Формирование матричных фотодиодных структур на основе гетероструктур GaN/AlGaN

¹ Седнев М.В., ^{1,2} Климанов Е.А., ¹ Демидов С.С., ¹ Шаронов Ю.П.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

Полупроводниковые материалы GaN и AlGaN признаны перспективными для создания фотоэлектронных устройств ультрафиолетового диапазона спектра, в том числе фотодиодных матриц большого формата. Эпитаксиальные гетероструктуры на подложках из сапфира оптимально подходят для разработки смотрящих матриц в спектральном диапазоне 200÷365 нм [1].

В тоже время для реализации этих возможностей существуют проблемы в области качества эпитаксиальных структур и технологии фоточувствительных элементов.

В настоящей работе представлены результаты исследований по разработке технологии фоточувствительных матричных структур формата 320x256 на основе отечественных гетероструктур, изготовленных эпитаксией из металлоорганических соединений.

Уровень легирования слоев *p-i-n* фотодиодных структур соответствовал значениям $3 \div 9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в *p* и *n* слоях, соответственно. Толщины варьировались в пределах $0.12 \div 0.5$, $0.15 \div 0.5$ и $0.6 \div 2$ мкм для *p*, *i* и *n* слоев, соответственно. Плотность дислокаций составляла 10^7 см^{-2} , рис.1.

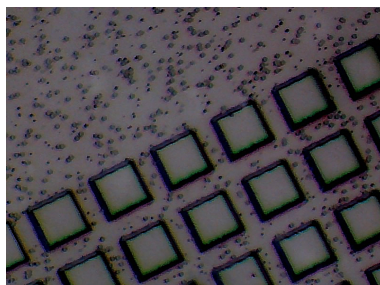


Рис.1 Фотография фрагмента матрицы *p-i-n* фотодиодов. Меза-структура сформирована ионным травлением. Видны ямки травления дислокаций. Шаг 30 мкм

В изготовлении фотодиодных структур использовались преимущественно ионно-плазменные процессы травления и напыления слоев. При формировании контактов применялось магнетронное напыление никеля и золота в сочетании со стандартными процессами фотолитографии. Типичные вольтамперные характеристики *p-i-n* фотодиода, измеренные при температуре 300 К в естественном комнатном освещении и освещении ультрафиолетовым источником представлены на рис.2.

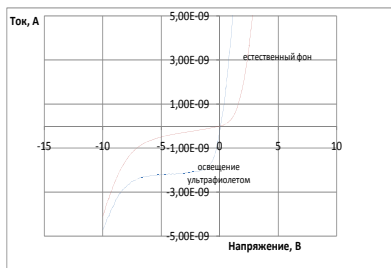


Рис.2 Вольтамперная характеристика PIN-фотодиода.

Литература:

1. Фотодетекторы ультрафиолетового диапазона на основе эпитаксиальных слоев GaN и GaN-AlxGa1-xN. Н.М.Шмидт, В.В.Лундин, А.В.Сахаров, Е.Е.Заварин. Прикладная физика, 2000, №5, с.95-100

A54 Четырёхканальное ФПУ на основе квадрантного кремниевое фотодиода для координатных систем

Боровков П.М., Казарин Л.Н., Потапов А.В., Фролов Н.В., Хакуашев П.Е.

ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

В настоящее время к координаточувствительным ФПУ выдвигается ряд повышенных требований, как по конструкционным, так и по фотоэлектрическим параметрам. В первую очередь это: минимальная пороговая чувствительность, улучшенная по крутизне пеленгационная характеристика, минимальные габариты и масса, а также устойчивость к внешним воздействующим факторам, в том числе к магнитным и электромагнитным полям. Во-вторых, к ФПУ предъявляются повышенные требования к динамическому диапазону входных оптических сигналов и диапазону линейности выходных сигналов, устойчивости к постоянной фоновой засветке и ряду других параметров.

Анализ возможных схемотехнических решений по улучшению чувствительности ФПУ приводит к выводу о необходимости применении на входе усилителя большой входной нагрузки (не менее $5 \cdot 10^6$ Ом). Необходимо использование фотодиода с минимальными значениями межэлементных зазоров, токов утечки и собственной ёмкости, сверхмалощумящего входного полевого транзистора, с последующей квазиоптимальной фильтрацией импульсных сигналов, для достижения максимального отношения сигнал/шум, применения многоступенчатой системы ослабления сигналов как на входе ФПУ, так и в последующих каскадах усилителя.

Исходя из выше изложенного, в ФПУ был применён фотодиод с минимальным зазором 50 мкм, диаметром фотоплощадки, не более 3,0 мм (с целью достижения минимальных значений токов утечки и ёмкости), при токовой импульсной чувствительности $S_{\lambda} \geq 0,4$ А/Вт, ёмкостью каждой площадки не более $C_{фд} < 1,0$ пФ и темновыми токами утечки $I_{ут} < 10$ нА, током охранного кольца не более 10 мкА, при значении $U_{фд} \approx 200$ В.

На входе усилителя применён лучший отечественный полевой транзистор с $e_{ш} < 1,2$ нВ·Гц^{1/2}, $C_{зи} < 4,5$ пФ и $C_{зс} < 1,5$ пФ типа 2П341А. В роли ключа на входе ФПУ использован транзистор типа 2Т3132А, как обладающий минимальной ёмкостью и

достаточным быстродействием в режиме малых токов ($C_k < 0,5$ пФ, $f_{гр} \geq 7,5$ ГГц), обеспечивающий автоматическую защиту от электрического пробоя входного транзистора ФПУ, при оптических импульсных перегрузках.

Из теории оптимальной фильтрации следует, что оптимум чувствительности находится в области времён близких к входной постоянной шума усилителя. Дальнейшее увеличение фронта выходного импульса приводит к ухудшению отношения сигнал/шум не менее 10% на каждую октаву. Расчёты показывают, что для достижения минимальной пороговой чувствительности значение фронта выходного импульса (при следующих входных параметрах: $C_{\Sigma вх} = 8,0$ пФ, $R_{\Sigma вх} \geq 5$ МОм, $e_{ш} < 1,2$ нВ·Гц^{1/2}, $I_{ут} < 10$ нА) не должно превышать величины более чем в 150 нс.

Необходимое значение коэффициента ослабления, около 600 раз, что вытекает из требований к динамическому диапазону, устанавливается путём подбора различных комбинаций потенциалов на входах ключей К1, К2, К3, а К4 выполняет функции стробирования, т.е. запрета прохождения сигналов. Усилительные каскады обеспечивают необходимое усиление, для достижения заданного значения вольтовой чувствительности ФПУ, с одновременной квазиоптимальной коррекцией выходного импульса. Работа на нагрузку 50 Ом обеспечивается мощным выходным повторителем. Для обеспечения устойчивости ФПУ к пульсациям по цепям питания в его состав включены фильтры питания.

Время восстановления пороговой чувствительности и окончания влияния амплитуды переходных процессов на выходной сигнал, в динамическом диапазоне входных сигналов 10^6 раз от порогового значения чувствительности, не может быть менее $12-14\tau_{вх}$. Так как входная постоянная времени ФПУ $\tau_{вх} \approx 40$ мкс и она не может быть снижена без ухудшения пороговой чувствительности ФПУ, за счёт уменьшения сопротивления входной нагрузки, то это не позволяет получить время восстановления чувствительности менее 500-600 мкс.

Несущей конструкцией ФПУ является цоколь, в виде прямоугольного параллелепипеда, изготовленный из сплава 29НК-ВИ, обеспечивающий согласованный температурный коэффициент расширения для металлостеклянного спая. На торцевой поверхности цоколя установлены квадрантный фотодиод и элементы входных цепей, а на боковых поверхностях 4 микросборки усилителей, изготовленные по гибридно-тонкоплёночной технологии. Защита внутреннего объёма ФПУ от внешних воздействующих факторов обеспечивается его герметизацией, методом лазерной сварки цоколя с крышкой, имеющей входное окно из стекла марки А-151. Для защиты от коррозии наружных поверхностей ФПУ применяются защитные покрытия. Таким образом, достигается моноблочная, герметичная металлостеклянная конструкция ФПУ не требующая обслуживания.

Изготовлен макет образца и измерены его основные фотоэлектрические характеристики.

А55 Мультиспектральные фотоприемные устройства космического базирования

Карпов В.В., Никифоров А.Ю., Петренко В.И., Козырев М.Е., Кузнецов Н.С.,
Гиндин П.Д., ¹Гарин П.В.
ОАО «МЗ «Сапфир», Москва, Россия
¹*МИТХТ, Москва, Россия*

Целью работы является разработка системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), с предположительным расположением на борту МКС.

Разработаны гибридные фотоприёмные устройства формата 3x4x288 на основе тройных твёрдых растворов кадмий-ртуть-теллур, полученных методом МЛЭ. Диапазон спектра матрицы 8-10,7 мкм.

Гибридные матрицы на основе фотоприёмных устройств (ФПУ) InSb на диапазон спектра 3-5 мкм формата 4x288. Матричные фоточувствительные элементы изготовлены на основе объемных монокристаллов с утоньшенной базовой областью с просветляющим покрытием ZnSe. Шаг элементов в обоих случаях соответствует стандарту «Sofradir» и составляет 43x56 мкм. Линейки выполнены в шахматном порядке, обеспечивающим беззачерную линейку с шагом 28 мкм в направлении 288 элементов.

Разработаны и изготовлены фильтры обеспечивающих диапазоны спектра разделяющие ДВ спектр ФПУ на три диапазона:

а) 8,2-8,6 мкм; б) 8,6-9,0 мкм; в) 10,2-10,7 мкм

и выделяющий СВ фильтр спектра 3,5-4,1 мкм нанесенный непосредственно на ФЧЭ.

Выделяющие фильтры на длинноволновый диапазон наклеиваются непосредственно на фочувствительный элемент.

Образцы ФПУ были выполнены в различных корпусах:

а) в заливных стеклянных криостатах;

б) в газонаполненных криостатах типа «лена»;

в) в вакуумных криостатах двух типов.

Один тип предназначен для размещения двух гибридных матриц на основе КРТ и InSb. ФЧЭ состоит из двух модулей ДВ диапазона и двух модулей СВ диапазона с соответствующим соединением по площадкам с одинаковым управлением. Модули расположены в шахматном порядке образующие квазилинейки длиной 576 элементов.

Второй, меньшего размера, предназначен для размещения по одной матрицы на основе КРТ и InSb. Вакуумные конструкции для двух типов ФПУ принципиально не отличаются друг от друга и состоят из:

а) держателя, представляющую из себя тонкостенную трубку из нержавеющей стали длиной 70 мм;

б) вакуумной полости;

в) фоточувствительного элемента на растре;

г) геттера;

д) керамического цоколя с металлизированной разводкой;

е) просветленное, германиевое входное окно, соединенное с крышкой держателя.

Оптическая схема изделий обладает одинаковыми относительными отверстиями $O = 0,38$, $F = 2,585$. С целью исключения переотражений холодная диафрагма для первой конструкции выполнена в виде гофрированного конуса длиной 122,3 мм и диаметром в верхней части $\varnothing 47,2$ мм.



Рис.1 ФПУ1 на стенде.

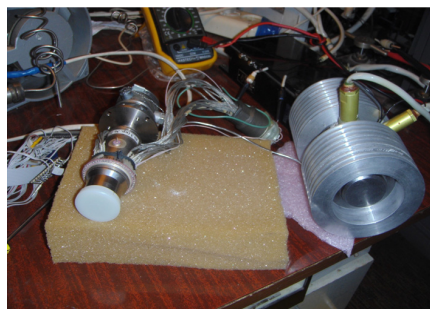


Рис.2 ФПУ 2на стенде с ГКМ

Максимальное выходное напряжение на обоих типах мультиплексоров составляет 3В. Динамический диапазон 60дБ.

A56 Охлаждаемые МФП и МФПУ диапазона 3÷5 мкм

Акимова Н.М., Долганин Ю.Н., Карпов В.В., Корольков В.П., Коротеев Ю.М.,
Кузнецов Н.С., Марушенко А.В., Тихомиров К.П., Чуркин С.Н.

ОАО «МЗ «Сапфир», Москва, Россия

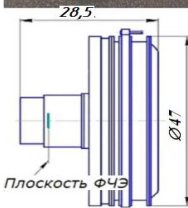
Приведены результаты разработки многоэлементных фотоприемников (МФП) резистивного типа и фотоприёмных устройств (МФПУ) на их основе для ИК-излучения диапазона 3-5 мкм. Изделия предназначены для использования в переносных и портативных измерительных устройствах, а также в системах обнаружения и визуализации теплового излучения. По основным параметрам МФП и МФПУ не уступают, а по некоторым превосходят аналогичные образцы известных фирм-производителей таких как: VIGO System S.A. (Польша), Judson Technologies Inc. (США), British Aerospace Electronics (BAE) System Infra-Red Ltd. (Великобритания), Hamamatsu Япония/США). Типовые характеристики разработанных МФПУ и МФП представлены в таблицах 1, 2.



Многоэлементный фотоприёмник ФР-228М:

- Материал МФП – гетероэпитаксиальные структуры кадмий-ртуть-теллур, полученные молекулярно-лучевой эпитаксией;
- Диапазон спектральной чувствительности – $1,0 \div 5,2$ мкм;
- Число фоточувствительных элементов (ФЧЭ) – 5;
- Размер ФЧЭ – 500×500 мкм, зазор 100 мкм;
- Удельная обнаружительная способность в максимуме спектральной чувствительности – $(7 \div 11) \cdot 10^{10}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2};

- Максимум спектральной чувствительности – 4,0-4,4 мкм;
- Вольтовая чувствительность $\sim 10^4$ В/Вт;
- Сопротивление – $(0,87 \div 1,2)$ кОм;
- Оптимальный ток смещения $(0,2 \div 0,3)$ мА;
- Охлаждение – двухкаскадный термоэлектрический охладитель;
- Температура фоточувствительного слоя при любой рабочей температуре не выше минус 30°C;
- Диапазон рабочих температур окружающей среды от минус 60°C до плюс 60°C.
- Сборка в корпусе типа ТО-8.



Многоэлементное фотоприёмное устройство «Планар»:

- Диапазон спектральной чувствительности – $1,0 \div 5,2$ мкм;
- Число фоточувствительных элементов (ФЧЭ) – 5;
- Размер ФЧЭ – 500×500 мкм, зазор 100 мкм;
- Удельная обнаружительная способность в максимуме спектральной чувствительности – $(5 \div 8) \cdot 10^{10}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2};
- Максимум спектральной чувствительности – 4,0-4,4 мкм;
- Вольтовая чувствительность $\sim 10^7$ В/Вт;
- Охлаждение – двухкаскадный термоэлектрический охладитель;
- Диапазон рабочих температур окружающей среды от минус 60°C до плюс 60°C.
- Сборка в корпусе «Планар».

А57 Динамическая взаимосвязь в МФПУ на основе антимонида индия

^{1,2} Болтарь К.О., Власов П.В., Лопухин А.А.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (ГУ), Долгопрудный, Россия

Динамическая взаимосвязь в МФПУ на основе фотодиодов из InSb заключается в том, что после окончания засветки какой либо группы пикселей матрицы инфракрасным излучением высокой интенсивности (например, АЧТ с температурой ≥ 500 К) с каждого из засвеченных пикселей на протяжении длительного времени

(вплоть до десятков минут) регистрируется остаточный сигнал в несколько раз превышающий шум (эффект памяти, эффект латентного изображения).

Величина эффекта составляет до 100 единиц шума МФПУ при засветке паяльником с температурой 230°C, или до 90 дБ от уровня мощного ИК-излучения. Этот эффект может ухудшать тактико-технические характеристики аппаратуры на основе МФПУ.

Основные закономерности явления:

- формируется мощным ИК-излучением как в МФПУ с германиевым окном (граница 1,7 мкм), так и в МФПУ с фильтром 3,6-4,8 мкм;

- латентное изображение, зависит от напряжения, приложенного к *p-n* переходам фотодиодов;

- латентное изображение наблюдается в МФПУ на основе InSb с пассивацией обратной стороны анодным окислом (АОП), диэлектриком Si₃N₄, диэлектриком ZnS и другими. Величина эффекта и вольтовая чувствительность МФПУ сильно зависят от материала пассивирующего покрытия;

- коэффициент фоточувствительности засвеченных пикселей больше, чем у незасвеченных пикселей.

Объяснение эффекта заключается в следующем.

Под действием мощного ИК излучения среднего ИК диапазона концентрация неосновных носителей в приповерхностной области со стороны падающего излучения существенно увеличивается, идет медленное заполнение медленных уровней в приповерхностной области окисла, и скорость поверхностной рекомбинации уменьшается.

После снятия мощного ИК-излучения поверхностный потенциал восстанавливается до равновесного значения с характерным временем перезарядки медленных поверхностных уровней (при температуре полупроводника ~80 К) и все это время скорость поверхностной рекомбинации остается уменьшенной.

Так проявляется эффект памяти элементов, подвергнувшихся интенсивной ИК-засветке:

- светлые пятна на изображении за счет лучшего детектирования фонового излучения

- увеличенная чувствительность в ранее засвеченных элементах.

Из интегральных распределений (рис. 1) исследованных МФПУ видно, что, динамическая взаимосвязь для МФПУ с покрытием обратной стороны анодным окислом в 10 раз больше, чем для МФПУ с покрытием ZnS.

Представленные на рис. 2 измерения эффективного времени жизни неосновных носителей заряда в МФПУ с покрытием анодным окислом (73 нс) и в МФПУ с покрытием ZnS (95нс) подтверждают, что в МФПУ с покрытием ZnS поверхностная рекомбинация также существенно меньше. Динамическая взаимосвязь обусловлена влиянием захваченного заряда на медленных уровнях в приповерхностной области на скорость поверхностной рекомбинации и, следовательно, на чувствительность МФПУ.

Интегральное распределение динамической взаимосвязи

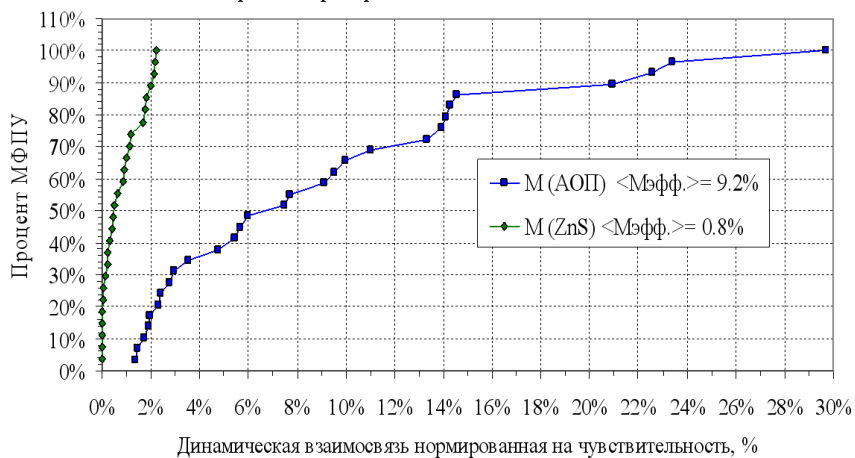


Рис. 1. Интегральные распределения динамической взаимосвязи для технологии изготовления (ZnS) и (АОП) МФПУ на основе InSb

Интегральное распределение эффективного времени жизни дырок

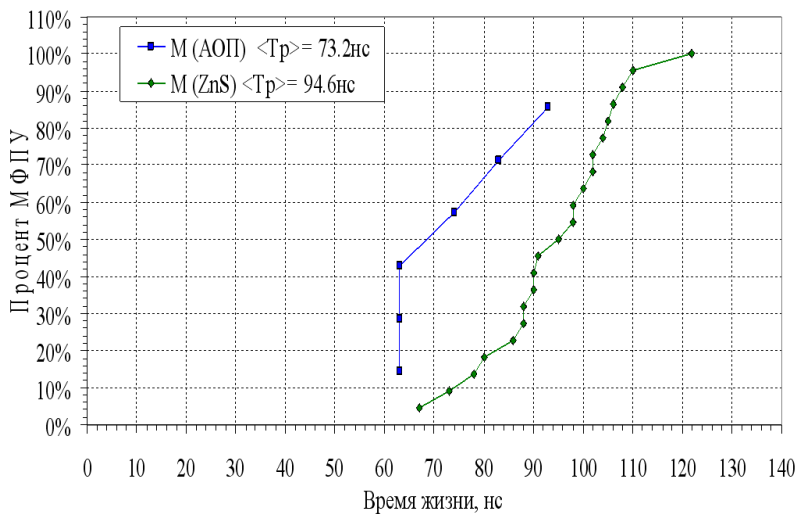


Рис. 2. Интегральные распределения эффективного времени жизни дырок для технологии изготовления (ZnS) и (АОП) МФПУ на основе InSb

А58 Исследование характеристик спектральной чувствительности фотодиодов на основе ГЭС КРТ

^{1,2}Болтарь К.О., ^{1,2}Никонов А.В., ¹Яковлева Н.И.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

В последние годы в развитии технологии создания ИК фотодиодов на основе КРТ достигнут значительный прогресс [1]. Методами жидкофазной и молекулярно-лучевой эпитаксии [2, 3] получены высококачественные гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) p -типа проводимости, в том числе структуры с варизонными слоями вблизи поверхности и границы раздела узкозонный полупроводник-подложка, обеспечивающими уменьшение поверхностной рекомбинации. При этом свойства высококачественных гетероэпитаксиальных слоев p -типа близки к свойствам объемных монокристаллов, в которых диффузионная длина неосновных носителей может достигать величины несколько десятков микрон. На основе гетероэпитаксиальных структур из КРТ состава $x \sim 0,2$ разработаны крупноформатные смотрящие матрицы дальнего ИК диапазона с высокими пороговыми характеристиками. Фоточувствительными элементами таких матриц являются n^+p фотодиоды, дифференциальное сопротивление которых при малом обратном смещении и рабочей температуре ~ 80 К определяется диффузионным током.

Общепринятые представления о диффузионном механизме темнового тока p - n перехода сложились достаточно давно [4] и основываются на одномерных моделях p - n -перехода с длинной и короткой (большей или меньшей диффузионной длины неосновных носителей, соответственно) базой [5], что позволяет проводить моделирование квантовой эффективности и спектральных характеристик фотодиодов для предварительных оценок параметров и проектирования архитектуры матриц чувствительных элементов (МФЧЭ).



Одномерная модель фотодиода с резким p - n переходом является классической для определения квантовой эффективности и диффузионного тока малоразмерных n^+p переходов на основе ГЭС КРТ [6] (рис. 1). Фотодиод с резким p - n переходом облучается со стороны области p -типа проводимости и подразделяется на области: область обеднения ($x_p < x < x_n$),

окружающую металлургическую границу перехода ($x = x_j$), и две квазинейтральные области ($0, x_p$) и (x_n, L) , где L – длина p - n перехода в направлении оси x , x_j – глубина залегания металлургической границы p - n перехода от поверхности.

Проведен расчет и построена модель характеристики квантовой эффективности фотодиодов на основе гетероэпитаксиальных структур КРТ. Для построения модели проанализированы литературные данные зависимости коэффициента поглощения ИК-излучения от состава КРТ и длины волны излучения [7]. Квантовая эффективность фотодиода вычисляется из уравнения фототока

$$\eta = -hcJ_{ph}(V_a) / qI_0(\lambda)\lambda$$

где $J_{ph}(V_A)$ – фототок, создаваемый падающим потоком излучения плотностью $I_0(\lambda)$ при $x=0$ на длине волны λ ;
 c – скорость света;
 \hbar – постоянная Планка;
 $I_0(\lambda)$ – плотность потока излучения на длине волны λ на поверхности полупроводника.

Плотность полного фототока резкого p - n перехода определяется суммой токов в областях p -, n -типа и области пространственного заряда

$$J_{ph} = J_{n,ph}(x_p) + J_{DR,ph} + J_{p,ph}(x_n)$$

и является прямо пропорциональной интенсивности $I_0(\lambda)$ излучения, падающего на поверхность фотодиода ($x=0$). Соответственно полная квантовая эффективность фотодиода с резким p - n переходом записывается в виде уравнения

$$\eta = -J_{ph}hc/qI_0(\lambda)\lambda = \eta_n + \eta_{DR} + \eta_p,$$

где значения квантовой эффективности во всех основных областях определяется выражениями из статьи [8].

Найдено распределение концентрации неравновесных носителей по толщине ГЭС КРТ и плотности тока n^+ - p фотодиода на основании решения одномерных уравнений диффузии и непрерывности для неосновных носителей заряда с граничными условиями, учитывающими поверхностную рекомбинацию на границах ГЭС КРТ.

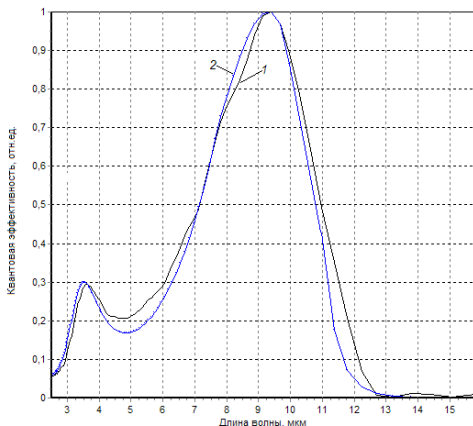


Рис. 2 – Спектральные характеристики фоточувствительности (1 - экспериментальная, 2 - расчетная) фотодиода на основе ГЭС КРТ ($x=0,222$ мол.дол., $L=9$ мкм)

антиотражающих покрытий оптического окна и полупроводниковой подложки ГЭС КРТ.

Численное моделирование спектральной характеристики фоточувствительности n^+ - p переходов на основе ГЭС КРТ позволило определить параметры гетероэпитаксиальных структур КРТ, выращенных методами ЖФЭ и МЛЭ: длину диффузии (9-15 мкм), скорость поверхностной рекомбинации s $(1-1,5) \cdot 10^5$ см/с, состав x и толщину эпитаксиального слоя L . Полученные данные позволяют дать предварительные оценки характеристик приборов на основе ГЭС КРТ, выращенных

Проведено численное моделирование спектральной характеристики фоточувствительности n^+ - p переходов на основе ГЭС КРТ в зависимости от ряда параметров ГЭС КРТ (состава x , длины диффузии L_n , коэффициента диффузии D_n неосновных носителей заряда и скорости поверхностной рекомбинации s). При расчете квантовой эффективности рассматривались две квазинейтральные области p - и n -типов и область обеднения. Сравнение экспериментальных характеристик с результатами моделирования представлены на рис. 2. Положение второго максимума в области коротких длин волн обусловлено наличием

Литература

1. Boltar K.O., Burlakov I.D., Filachev A.M., Klimanov E.A., Ponomarenko V.P., Solyakov V.N., Stafeev V.I. Single and Matrix HgCdTe Photovoltaic Detectors // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – v. 16. – № 4. – 2007 – p. 234-247.
2. Белов А.Г., Белогорохов А.И., Лакеенков В.М. Об особенностях электрофизических свойств гетероструктур CdxHg1-xTe/CdZnTe.//ФТП. 2001. Т. 35. вып. 8. СС. 917-919.
3. Сидоров Ю.Г., Дворецкий С.А., Варвин В.С. и др. Молекулярно-лучевая эпитаксия твердых растворов кадмий-ртуть-теллур на «альтернативных» подложках // ФТП, 2001, т. 35, вып. 9, сс. 1092-1101.
4. Shokley // Bell System Technical Journal, 1949. Vol. 28, P. 435.
5. M.B. Reine, A.K. Sood, T.J. Tredwell. In Semiconductors and semimetals. - New York: Academic Press, 1981. - Vol. 18, Ch. 6. p. 201.
6. M.A. Kinch, F. Aqariden, D. Chandra, P-K. Liao, H.F. Schaake, H.D. Shih // Journal of Electronic Materials, 2005, Vol. 34, № 6. pp. 880-884.
7. Lubzens D., Rosenfeld D., and Nemirovsky Y. The noise equivalent temperature difference performance of HgCdTe photodiode array.//Infrared Phys. 1988. Vol. 28. No. 6. PP. 417-423.
8. Уайт М.Г. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения. Пер. с англ., под ред. Суриса Р.А. — Москва: Мир, 1979. Часть II., СС. 28-40.

A59 Основы конструирования фотоприемных устройств на основе $p-i-n$ фотодиодов из AlGaIn

^{1,2}Болтарь К.О., ^{1,3}Бурлаков И.Д., ¹Патрашин А.И., ¹Яковлева Н.И.

¹ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

²МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

³МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

Благодаря своим уникальным свойствам полупроводниковые тройные соединения AlGaIn являются одним из перспективных материалов для обнаружения в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне спектра [1, 2]. Его основные коммерческие и военные применения включают мониторинг атмосферы, УФ-астрономию, детектирование возгораний, медицину, предупреждение об опасности ракетного нападения, обнаружение компонентов биологического и химического оружия и многое другое. Для УФ применений на сегодняшний день разработаны: фоторезисторы, диоды Шоттки, фотодиоды на основе $p-n$ переходов, лавинные фотодиоды и фототранзисторы. Наиболее перспективными фотоприемными устройствами (ФПУ) являются $p-i-n$ структуры на основе гетерозэпитаксиальных соединений (ГЭС) AlGaIn/GaN, позволяющие реализовать наибольшее значения обнаружительной способности и вольтовой чувствительности в заданном спектральном диапазоне.

Гетерозэпитаксиальные соединения на основе нитридов AlGaIn/GaN имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при конструировании фотоприемников. Значения ширины запрещенной зоны и коэффициенты преломления отдельных слоев, составляющих гетерозэпитаксиальную структуру, могут различаться весьма существенно, но еще более существенно могут различаться постоянные решеток соединений. Однако если в многослойной структуре нет больших отличий между слоями, то структуры на основе слоев с небольшим изменением молярного состава

могут выращиваться практически без дефектов при условии, что выполняются определенные соответствующие режимы выращивания, главным из которых является наличие структурно совершенной подложки с близкой кристаллической решеткой.

По чувствительности в ультрафиолетовом спектральном диапазоне длин волн ГЭС AlGaIn подразделяются на два типа – видимо-слепые (BC) и солнечно-слепые (CC) [3]. Состав и порядок расположения слоев ГЭС AlGaIn обоих типов представлен на рис. 1.

Контактный слой GaN p^+ -типа	Контактный слой GaN p^+ -типа
Фотодиодный слой GaN p -типа	Фотодиодный слой $Al_{0,45}Ga_{0,55}N$ p -типа
Поглощающий слой GaN i -типа	Поглощающий слой $Al_{0,45}Ga_{0,55}N$ i -типа
Фильтрующий слой $Al_{0,23}Ga_{0,77}N$ n -типа	Фильтрующий слой $Al_{0,64}Ga_{0,36}N$ n -типа
Буферные слои AlN (GaN)	Буферные слои AlN (GaN)
Оптически прозрачная подложка из сапфира Al_2O_3	Оптически прозрачная подложка из сапфира Al_2O_3
а) Видимо-слепая ГЭС AlGaIn	б) Солнечно-слепая ГЭС AlGaIn

Рис. 1. Состав и порядок расположения слоев ГЭС AlGaIn

В представленных $p-i-n$ структурах имеются полупроводниковые слои n -, i - и p -типов проводимости. Как видно из рисунка, для ультрафиолетового матричного фотоприемного модуля (УФМ) использованы объединенные в гетероструктуру слои, близкие по постоянной кристаллической решетки, но обладающие различными электрическими, оптическими и фотоэлектрическими свойствами. Входящие в представленные структуры гетеропереходы выполняют различные функции, включая фильтрацию, детектирование и выделение спектральной области чувствительности.

Для считывания сигнала с матрицы ФЧЭ на основе AlGaIn в отличие от ФПУ средневолнового и длинноволнового инфракрасного диапазонов спектра, в которых применяется схема входной ячейки прямой инжекции (DI), используется кремниевая БИС считывания с входной ячейкой, выполненной на основе емкостного трансимпедансного усилителя (СТИА) (рис. 2). Применение данного типа входной ячейки обусловлено низкими темновыми токами и низким уровнем шума AlGaIn фотодиодов. По сути, в настоящее время уровень шумов ФПУ определяется шумом БИС считывания, а не собственным шумом AlGaIn фотодиодов.

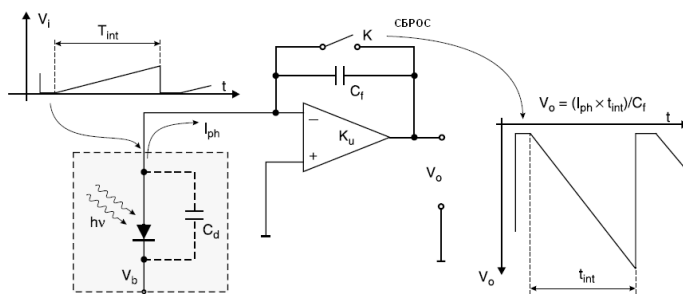


Рис. 2 – Входная ячейка БИС считывания

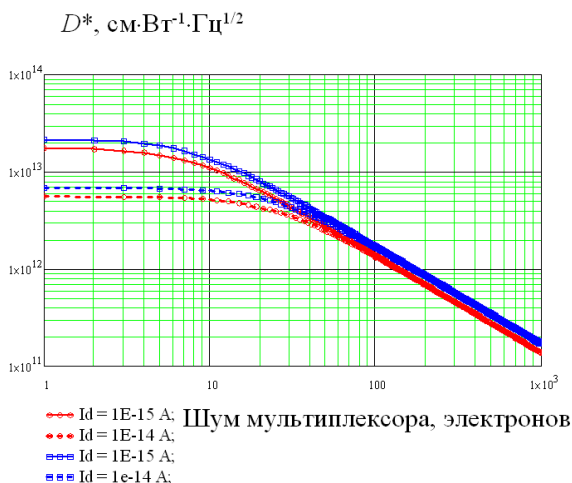


Рис. 3. - Влияние уровня шума БИС на обнаружительную способность УФМ

Ячейка считывания типа СТИА состоит из инвертирующего усилителя (чаще каскадного типа, реже дифференциального), емкости интегрирования, включенной в цепь обратной связи усилителя, ключа сброса емкости интегрирования. Накопление заряда происходит на емкости интегрирования, величина которой определяет коэффициент усиления схемы. Схема СТИА обеспечивает стабильное напряжение смещения фотодиода, линейную функцию передачи сигнала, высокое усиление, низкий входной импеданс.

Особое внимание при конструировании УФМ на основе AlGa_N уделялось влиянию уровня шума БИС на выходные параметры прибора. Зависимости удельной обнаружительной способности D^* для солнечно-слепых и видимо-слепых фотоприемных устройств с заданными уровнями темнового тока от уровня шума БИС приведены на рис. 3.

Графики (рис. 3) подтверждают возможность достижения удельной обнаружительной способности $D^* \sim 1 \cdot 10^{13}$ см·Вт⁻¹·Гц^{1/2} при необходимости выполнения следующих исходных условий: высокое качество исходных гетероэпитаксиальных структур AlGa_N, отработанность технологического процесса изготовления УФ фотодиодных матриц и высокое совершенство кремниевых интегральных схем считывания.

Литература

- 1.P. Lamarre etc., AlGa_N p-i-n Photodiode Arrays for Solar-Blind Applications. // Mat. Res. Soc. Symp. Vol. 639 © 2001 Materials Research Society.
- 2.M.B.Reine etc. Solar-blind AlGa_N 256×256 p-i-n detectors and focal plane arrays. // Proc. of SPIE Vol. 6119 pp. 611901-1 - 611901-15 (2006).
- 3.J.P.Long etc., UV detectors and focal plane array imagers based on AlGa_N p-i-n photodiodes. // Opto-electronics Reviws, 10(4) pp. 251-260 (2002).

А60 Методы исследования пространственно-частотных характеристик матричных ИК-фотоприемников

^{1,2}Касаткин В.А., ²Рудневский В.С., ²Полунеев В.В.

¹МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия
²ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

Приёмные системы инфракрасного излучения в общем случае используются для обнаружения тепловых явлений на расстоянии. Эти системы, чаще всего формирующие двумерное изображение, должны удовлетворять ряду жёстких требований в зависимости от вида применения. Чаще всего, аппаратура предназначена для чисто качественного анализа тепловых явлений и в этом случае речь обычно идёт визуализации теплового распределения объектов, которое непосредственно глазом не воспринимается. Система при этом формирует изображение, в котором видимый яркостной контраст пропорционален тепловому контрасту наблюдаемого объекта.

Качество системы зависит как от чувствительности, так и от разрешения, причем увеличение чувствительности приводит к уменьшению разрешения, поэтому невозможно сконструировать тепловизионную систему с неограниченным разрешением и неограниченной чувствительностью. Минимально разрешимая разница температуры (МРРТ) - это весьма ценный и один из важнейших параметров качества, который достаточно полно описывает общую производительность системы, включая наблюдателей, и именно ему уделено основное внимание.

В данной работе проведены исследования и последующие измерения характеристик матричных ИК-фотоприемников, таких как, эквивалентная шуму разность температур (ЭШРТ), модуляционная передаточная функция (МПФ) и минимально разрешимая разность температур (МРРТ). Эти характеристики позволяют в достаточной мере судить о качестве фотоприемных устройств, поэтому методы измерения указанных характеристик представляют большой интерес.

Показано, что МРРТ также зависит от алгоритма обработки дефектов изображения в электронном цифровом блоке обработки изображений (см. Рис 1).

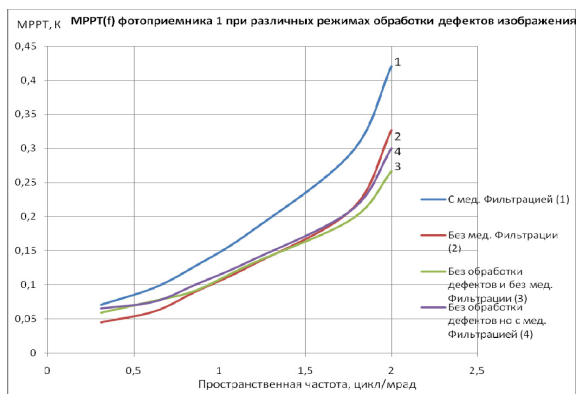


Рис. 1 Зависимость МРРТ от пространственной частоты при различных режимах обработки дефектов изображения

В работе предложен метод измерения температурно-частотных характеристик матричных ИК-фотоприёмников, основанный на взаимосвязи вышеперечисленных трёх параметров: ЭШРТ, МПФ, МРРТ.

Литература

- [1] *Курбатов Л.Н.* Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. М.: Изд-во МФТИ, 1999. 320 с.
- [2] *Ллойд Дж.* Системы тепловидения. Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 417 с.
- [3] *Celik M.* Measurements and modeling enhancements for the minimum resolvable temperature difference model, VISMOD II. Naval Postgraduate School, 1996. 194с.
- [4] *Госсорг Ж.* Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с франц. М.: Мир, 1988. 416 с.
- [5] *Holst G.C.* Electro-Optical Imaging System Performance, Second Edition. Florida: JCD Publishing, 2000. 455 с.

А61 Анализ многоспектрального ФПУ

¹Патрашин А.И., ^{1,2}Болтарь К.О., ¹Бочков В.Д., ^{1,3}Бурлаков И.Д., ¹Дражников Б.Н.,
¹Кузнецов П.А., ^{1,2}Никонов А.В., ^{1,2}Соляков В.Н., ¹Яковлева Н.И.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МФТИ (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

³ МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

Проведен анализ конструкции многоспектрального ФПУ и расчет основных фотоэлектрических параметров – удельной обнаружительной способности (D^*), динамического диапазона (DR) и пороговой разности температур (NETD).

ФПУ включает 6 независимых ФПЛ. Каждая из них имеет формат 6х576 элементов и работает в цифровом режиме ВЗН. Цифровой режим ВЗН означает, что проводится считывание накопленного аналогового сигнала с каждого ФЧЭ, оцифровка его с помощью блока аналогово-цифровой обработки и последующее цифровое ВЗН-суммирование соответствующих сигналов и шумов. Каждая ВЗН-линейка имеет свой спектральный диапазон: 3,0-5,0 мкм; 8,0-8,8 мкм; 8,8-9,6 мкм; 9,6-10,4 мкм; 10,4-11,4 мкм; 11,4-12,5 мкм. Все ФПЛ расположены в зоне облучения размером 16х16 мм. Рабочая температура ФПЛ – (60-65) К.

Облучение ФПЛ осуществляется объективом с диаметром выходного зрачка $D = 280$ мм и фокусным расстоянием $L = 600$ мм. Расстояние от холодной диафрагмы, не пропускающей паразитное облучение, до плоскости изображения составляет $l = 122$ мм. Параметры рассчитывались для холодных диафрагм двух типов: круглой и ромбовидной [1].

Радиус круглой диафрагмы рассчитывался из следующего соотношения:

$$r = \frac{l}{2} \cdot (D + d) \cdot \frac{l}{L} - \frac{l}{2} \cdot d$$

а форма ромбовидной диафрагмы описывается следующим выражением [1]:

$$r(\psi, l) = \frac{1}{2} \cdot \left[\sqrt{\frac{D^2 \cdot l^2}{L^2} - \left(\frac{L-l}{L}\right)^2} (a|\sin \psi| - b|\cos \psi|)^2 - \left(\frac{L-l}{L}\right) (a|\cos \psi| + b|\sin \psi|) \right]$$

Величины полезной и паразитной фоновой облученности ФЧЭ рассчитывались в соответствии с методом, изложенным в [2].

Показано, что при наличии паразитной подсветки от холодного экрана роль эффективного темнового тока играет сумма темнового тока фоточувствительных элементов (ФЧЭ) и паразитного фототока, генерированного этой подсветкой. Приведены аналитическая и графическая зависимости эффективного темнового тока ФЧЭ от температуры экрана. В соответствии с полученными данными выбрана необходимая температура холодного экрана.

Рассчитаны величины полезного фототока, генерированного исходящим из объекта излучением, и паразитного фототока, генерированного излучением, исходящим от фоновозащитного экрана. Приведены также данные о полезной и паразитной фоновой облученности в плоскости фотоприемных линеек (ФПЛ).

Расчеты сигналов и шумов ФЧЭ ФПЛ проведены с учетом их пространственного расположения в зоне облучения ФПУ.

Расчеты зависимостей сигналов, шумов и фотоэлектрических параметров каналов ФПЛ выполнены в соответствии с аналитической моделью многорядных ИК МФПУ [3].

Проведены исследования зависимости D^* и NETD каналов всех ФПЛ от величины темнового тока ФЧЭ в диапазоне от 10^{-12} А до 10^{-8} А, температуры холодного экрана в диапазоне от 80 К до 180 К, температуры сигнального излучения в диапазоне от -60 °С до $+60$ °С, шума мультиплексора в диапазоне от 10 электронов до 10^3 электронов, времени накопления в диапазоне от 10 мкс до 500 мкс и квантовой эффективности ФЧЭ в диапазоне от 10^{-2} до 0,99.

Результаты анализа позволяют определить граничные величины темновых токов, времени накопления и квантовой эффективности ФЧЭ, температуры холодного экрана, шума мультиплексора, необходимые для обеспечения ФПУ в каждом спектральном диапазоне заданной величины NETD.

Литература:

- [1] А.И. Патрашин. // Прикладная Физика, 2011. № 3. С. 98.
- [2] А.И. Патрашин. // Прикладная Физика, 2010. № 3. С. 123.
- [3] А.И. Патрашин, А.В. Никонов, А.М. Филачев., Аналитическая модель многорядных ИК МФПУ // XXII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2012

А62 Экспериментальное исследование метода расчета параметров ИК МФПУ

¹Патрашин А.И., ^{1,2}Бурлаков И.Д., ¹Лопухин А.А., ¹Яковлева Н.И.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

Необходимым условием разработки и производства фотоприемных устройств является корректное измерение параметров. На практике основными экспериментально измеряемыми величинами являются сигнал и шум фотоприемника, используя которые рассчитываются все основные фотоэлектрические характеристики прибора. Для измерения параметров одиночных фотодиодов используется стандартный метод [1], в котором засветка приемника производится стандартным АЧТ с малой излучающей поверхностью и температурой 500°С через вращающийся механический модулятор. Если же необходимо измерять параметры матричных ИК ФПУ, включающих холодную диафрагму меньшего, чем матрица размера, то возникает невозможность одновременной засветки всей фоточувствительной площади матрицы

фоточувствительных элементов (МФЧЭ). Ее можно устранить, если применить АЧТ с излучающей поверхностью достаточно больших размеров, которые позволят облучать всю площадь МФЧЭ. При таких размерах приходится снижать температуру излучающей поверхности АЧТ и отпадает возможность модуляции его излучения. Следовательно, в суммарном регистрируемом сигнале начинают присутствовать компоненты, обусловленные темновым током и паразитной подсветкой ФЧЭ. Поэтому возникают трудности с расчетом фотоэлектрических параметров ИК МФПУ. В связи с этим необходима теоретическая модель работы ИК МФПУ, позволяющая точно описывать измеряемые сигналы и шумы приемника для любой температуры излучения АЧТ.

Такая модель была построена в [1], [2] и экспериментально исследована в данной работе. Для этого экспериментально и теоретически исследованы зависимости сигнала и шума от температуры фона и времени накопления в ИК МФПУ на основе фотодиодов из антимионид индия.

Использовалось АЧТ с минимальным размером излучающей поверхности, удовлетворяющим следующему соотношению:

$$D \geq \frac{L \cdot d + d_1 \cdot (L - l)}{l}$$

где L – расстояние от АЧТ до МФЧЭ;

d – диаметр охлаждаемой диафрагмы;

d_1 – диагональ фоточувствительного поля МФЧЭ;

l – расстояние от МФЧЭ до диафрагмы.

В используемой установке АЧТ имел размер излучающей поверхности 15×15 см, расстояние от МФЧЭ до АЧТ не превышало 14 см, Диаметр охлаждаемой диафрагмы был равен 12,6 мм, а диагональ поля равнялась 12,3 мм. Таким образом, МФЧЭ «видел» сквозь холодную диафрагму только излучающую поверхность АЧТ [3]. Диапазон изменения температуры фонового излучения от 20°С до 30°С с шагом в 1°С. Диапазон изменения величины времени накопления от 0,0026 мс до 0,788 мс.

Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с расчетными данными по сигналам и шумам ИК МФПУ.

Теоретические зависимости были рассчитаны с использованием следующих характеристик ИК МФПУ: размеров ФЧЭ и фоточувствительного поля, спектрального диапазона чувствительности, геометрических размеров холодной диафрагмы, темнового тока и квантовой эффективности ФЧЭ.

Экспериментальные и расчетные зависимости выходных сигналов и шумов от температуры АЧТ и времени накопления показали отличное соответствие друг другу при значениях квантового выхода $\eta=0,46$, и суммарного шума мультиплексора и измерительной системы 0,26 мВ, что хорошо согласуется с технологическими, конструктивными и схемотехническими характеристиками МФПУ.

Литература

1. Патрашин А.И., Метод расчета параметров ИК МФПУ//Прикладная физика, 2010 г., № 2, С. 103.
2. Патрашин А.И., Метод расчета фоновой облученности МФПУ с холодной диафрагмой произвольной формы//Прикладная физика, 2010 г., № 3, С. 123.
3. Patrashin A.I., Ivanov G.A., Testing unit for measuring photoelectric characteristics of IR arrays//Proceedings of SPIE, 1998, V.3379, pp. 555-560.

Б01 Диэлектрические свойства в монокристаллах CuInSe_2

¹ Исмаилов А.А., ¹ Ахмедзаде Н.Д., ¹ Ширинов М.М., ² Джафарова Г.С.

¹ *Институт физики НАН, Баку, Азербайджан*

² *Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан*

Интерес к полупроводниковым соединениям типа $\text{A}^{\text{I}}\text{B}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$ обусловлен перспективностью использования их в полупроводниковом приборостроении. Эти соединения являются оптически анизотропными, в них наблюдается явление двойного лучепреломления, которое может быть использовано в нелинейных оптических преобразователях. С другой стороны, эти соединения, кристаллизующиеся в структуре халькопирита, зарекомендовали себя как перспективные материалы для использования при создании солнечных преобразователей, а также при создании тонкопленочных гетеропереходов.

Физические свойства и зонная структура полупроводниковых соединений $\text{A}^{\text{I}}\text{B}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$ не достаточно исследованы в связи с трудностью получения гомогенных монокристаллов. Исследовано влияние температуры на диэлектрические свойства монокристаллов CuInSe_2 , являющейся целью настоящей работы.

Для исследования диэлектрических свойств выращивании монокристаллов CuInSe_2 методом Бриджмена предварительно получали материал в виде поликристаллических слитков непосредственным сплавлением из элементов (медь марки ВЗ, индий-ИН000, Se-“ОСЧ 17-3”) с использованием вибрации.

Образцы для электрических измерений были изготовлены в “сэндвичевой” структуре, и постоянное электрическое поле прикладывали поперек естественных слоев монокристалла CuInSe_2 . С целью предотвращения возможности окисления образцов во время их измерений, образцы находились в вакууме внутри термостатируемой камеры. Температура образцов контролировалась медь-константановой термопарой с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Исследования велись в квазистатическом температурном режиме, при этом скорость изменения температуры составляла 0,1 К/мин. Вследствие высокой электропроводности образцов CuInSe_2 в исследуемом температурном интервале 77-273 К измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь осуществлялись на частоте $f = 1000$ МГц с помощью моста переменного тока.

В качестве контактного материала использовали серебряную пасту. Толщина изученных монокристаллов CuInSe_2 составляла $2,5 \times 10^{-2} \text{ см}^2$ мкм, а подконтактная площадь $2,2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$.

Изучение диэлектрических свойств при низких температурах позволяет получить ценную информацию.

Температурных зависимостях диэлектрической проницаемость в монокристаллах CuInSe_2 обнаружена аномалия. С ростом температуры диэлектрическая проницаемость увеличивается, и при температуре 173 К наблюдается максимум значение диэлектрические проницаемости которая после температура 173 К начинает уменьшаться, по-видимому, это связано с релаксационными процессами.

В заключение частоте $f = 1000$ МГц и температурном интервале 77-273 К поведение температурные зависимости на диэлектрические проницаемости в монокристаллах CuInSe_2 обнаруженного аномалия связано с релаксационными процессами.

¹Карамалиев Р.А., ²Каджар Ч.О.

¹ *Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан*

² *Институт физики НАН, Баку, Азербайджан*

Оптические свойства наночастиц металлов связаны с коллективными колебаниями электронов проводимости (плазмонные резонансы) вблизи поверхности частицы под действием электромагнитного излучения. Резонансы наноразмерных металлических частиц приводят к формированию интенсивных полос поглощения в видимом диапазоне излучения. Известно, что широкие применения металлических наночастиц связаны с их особыми оптическими свойствами, такими как большие сечения поглощения излучения, селективный характер этого поглощения и высокая концентрация электромагнитной энергии вблизи наночастиц в области, много меньшей длины волны излучения.

В настоящей работе в приближении теории Максвелла Гарнетта теоретически исследовано поглощение, отражение и пропускание электромагнитного излучения композитной тонкой пленкой, представляющей собой прозрачную диэлектрическую матрицу с включениями сферических металлических наночастиц с радиусом r намного меньшим по сравнению с длиной волны λ падающей на поверхность пленки. Исследование оптических свойств композитной пленки проводимое при выполнении условия $r \ll \lambda$ соответствует электростатическому приближению теории рассеяния Ми. В данной работе теоретический анализ рассматриваемых оптических процессов проводится с учетом размеров металлических наночастиц.

Учет размерных эффектов в выражении комплексной диэлектрической проницаемости металлических частиц $\epsilon(\omega, r)$ осуществляется с помощью следующего выражение [1]:

$$\epsilon(\omega, r) = \epsilon_b(\omega) + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma_0)} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}$$

где ω - частота электромагнитной волны, r - характерный радиус наночастицы вдоль направления электрического поля электромагнитной волны, ω_p - плазменная частота, $\epsilon(r \rightarrow \infty) = \epsilon_b$ - диэлектрическая проницаемость массивного металла, γ_0 - скорость релаксации электронов в объеме металла, γ - размерно-зависимая постоянная затухания, равная обратному среднему времени пробега электрона в наночастице.

Рассмотрены отражение, поглощение и пропускание тонкой пленки плоскополяризованной световой волны с длиной λ , падающей перпендикулярно из прозрачной среды 1 на плоскую поглощающую пленку с толщиной h из композитного материала с сферическими металлическими наночастицами 2 нанесенного на прозрачную диэлектрическую подложку 3 [2].

Расчеты проведены для наночастиц серебра при длине волны падающего излучения $\lambda = 400$ нм. Для длины волны внешнего излучения $\lambda = 400$ нм значение ϵ_b массивного серебряного образца равно $-3,72 + 0,29i$. Тогда комплексный показатель преломления серебряного образца можно представить в виде: $\tilde{n} = 0,075 + 1,93i$. При длине волны внешнего излучения $\lambda = 400$ нм получены следующие размерно-зависимые результаты комплексной диэлектрической проницаемости наночастиц серебра: $\epsilon = -3,68 + 0,81i$ - для сферической частицы радиуса $r = 5$ нм, $\epsilon = -3,72 + 0,42i$ - для $r = 20$ нм, $\epsilon = -3,72 + 0,36i$ - для $r = 40$ нм. Как видно из представленных результатов для сферических частиц серебра, поправка, учитывающая конечность размеров серебряной частицы, приводит главным образом к изменению мнимой части ϵ . С помощью

полученных соотношений детально проанализированы зависимости спектральных характеристик от параметров композита: диэлектрической проницаемости прозрачного матричного материала пленки, комплексной диэлектрической проницаемости наночастиц серебра, радиуса и объемного содержания наночастиц, а также толщины пленки. Показано, что такие нанокompозитные пленки в зависимости от ее параметров избирательно по толщине отражает падающее на нее оптическое излучение. Обсуждены условия реализации эффекта безотражательного поглощения падающего излучения в этих пленках.

1. S. V.Gaponenko, Introduction to Nanophotonics, Cambridge University Press, (2010).

2. М.Борн, Э.Вольф, Основы оптики, Наука, М., (1970).

Б03 Энергетические спектры в монокристаллах селенида галлия

Керимова Э.М., Исмаилов А.А.

Институт физики НАН, Баку, Азербайджан

Моноселенид галлия принадлежит к группе полупроводниковых соединений A^3B^6 , кристаллизующихся в слоистую структуру типа GaS. Существенное влияние на электрические свойства монокристаллов GaSe оказывают концентрация и тип введенных примесей.

Целью настоящей работы является исследование низкотемпературных зависимостей электропроводности и определение энергетических спектров в монокристаллах GaSe+1%Tl, и GaSe+2,5%Tl на фоне монокристаллов GaSe.

Для исследования электрофизических свойств нелегированного и легированного различными процентами атомов таллия монокристаллы моноселенида галлий выращены методом Бриджмена. Были получены кристаллы ϵ -политипа. Параметры элементарной ячейки нелегированного GaSe, рассчитанные по линиям с $2\theta > 60^\circ$, составили $a = 3,755 \pm 0,001 \text{ \AA}$; $c = 15,945 \pm 0,002 \text{ \AA}$. Типичные размеры были порядка $1 \times 2 \times 6 \text{ мм}^3$.

В качестве материала для электрических контактов использовался металлический индий. Перед нанесением электродов соответствующие поверхности образцов полировались. С целью предотвращения возможности окисления образцов во время их измерений, образцы находились в вакууме внутри термостатируемой камеры. Температура образцов контролировалась медь-константановой термопарой с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Исследования велись в квазистатическом температурном режиме, при этом скорость изменения температуры составляла $0,1 \text{ К/мин}$.

Исследование проведено так, что внешнее постоянное электрическое поле было приложено поперек естественных слоев монокристаллов, т.е. вдоль их C -оси.

Исследована температурная зависимость при температурном интервале $111 \div 294 \text{ К}$ электропроводности GaSe+1%Tl, и GaSe+2,5%Tl. Относительная погрешность измерений электропроводности изученных образцов при различных температурах составляла 2–5%. Изучение электрических свойств при низких температурах позволяет получить ценную информацию о запрещенной зоне.

Нелегированный моноселенид галлия и GaSe+1%Tl, и GaSe+2,5%Tl имели p -тип проводимости. Построен график $\lg \sigma$ от $10^3/T$. Показано, что при увеличении примеси таллия электропроводность увеличивалась т.е. энергия активации уменьшалась с $0,14$ до $0,06 \text{ эВ}$ при этом наклон температурной зависимости электропроводности $\lg \sigma$ ($10^3/T, \text{ К}^{-1}$) уменьшается, при добавление примесей электропроводность увеличивается

и наклон почти выпрямляется. Из наклона зависимости этого графика найдены нижеследующие параметры: энергия активации, которого оказалось GaSe $E_a=0,14$ эВ, GaSe+1%Tl $E_a=0,12$ эВ, GaSe+2,5%Tl $E_a=0,06$ эВ.

На фоне зонной структуры моноселенида галлия и GaSe+1%Tl, и GaSe+2,5%Tl определено их месторасположение в зависимости от примеси. Если кристаллы имеют p -тип проводимости энергия активации считается от потолка валентной зоны.

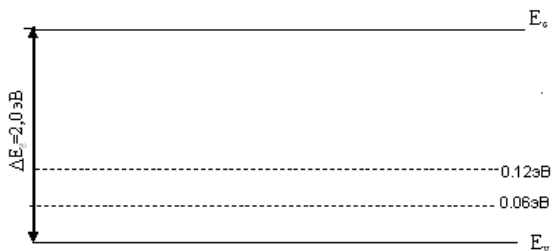


Рис.1 Энергетические спектры в монокристаллах GaSe+1%Tl ($E_a=0,12$ эВ), GaSe+2,5%Tl ($E_a=0,06$ эВ) на основе селенида галлия

Б04 Изучение фотоэлектрических и электрофизических свойств солнечных элементов, изготовленных с аморфным металлическим сплавом

Пашаев И.Г.

Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан

Для изготовления кремниевых солнечных элементов были использованы монокристаллические кремниевые пластины с дырочной проводимостью легированные бором КДБ10(111). Толщина кремниевых пластин была 280мкм. Значение удельного сопротивления подложки составило в среднем 100м·см; соответствующая величина концентрации примеси составляет примерно $1 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3}$. [1.3] Омический контакт к тыльной стороне пластины кремния получен путем создания сильнолегированной p^+ области и нанесен на нее методом электроннолучевого испарения в вакууме аморфной металлической пленки металла $\text{Ti}_{60}\text{Au}_{40}$, (αTiAu) [2]. В данной работе рассмотрены экспериментальные результаты фотоэлектрических и электрофизических свойств солнечных элементов $\alpha\text{TiAu}/\text{Si-}n^+-p-p^+$ до и после ультразвуковой обработкой (УЗО). Структура плёнки сплава контролировалась рентгенографическим анализом, как показано на рисунке-1. Сплав $\text{Ti}_{60}\text{Au}_{40}$ имеет аморфную структуру[2]

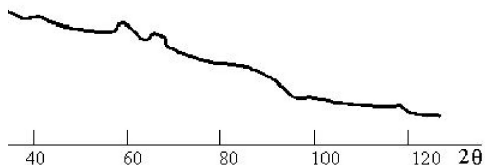


Рис. 1. Рентгеноструктурный анализ аморфных металлических пленок $\text{Ti}_{60}\text{Au}_{40}$

Найдены фотоэлектрические ($I_{к.з.}$ - ток короткого замыкания, $U_{х.х.}$ - напряжение холостого хода, A - безразмерный коэффициент, P_{max} - максимальная выходная

мощность, и ξ - коэффициент заполнения) и электрофизические (τ_n - коэффициент диффузии и время жизни неосновных носителей, L_n - диффузионная длина неосновных носителей, I_0 - обратный ток насыщения, $N_{эф}$ - эффективная концентрация ионизированных центров, E_a - энергия активации) параметры образца СЭ до и после УЗО, что проявляется в уменьшении тока короткого замыкания $I_{кз}$ и напряжении холостого хода $U_{хх}$ и как следствие, в снижении максимальной выходной мощности P_{max} .

В таблице 1 представлены, фотоэнергетические параметры, в том числе, приведены значения этих параметров после каждого этапа ультразвуковой обработки. Такое построение таблицы позволяет проследить, на какую величину изменятся фотоэнергетические параметры при подаче на образец ультразвуковой волны со строго заданной мощностью, частотой и в течение заданного времени.

Таблица 1. Фотоэлектрические параметры $\alpha TiAu / Si-n^+ - p-p^+$ (до и после УЗО при $P_{изл} = 100 \text{ Вт/см}^2$ и $T = 300\text{K}$).

Состояние образца ПАРАМЕТРЫ	до УЗО	после УЗО-1	после УЗО-2	после УЗО-3
$I_{кз}, \text{мА}$	29,56	24,87	25,56	22,00
$U_{хх}, \text{В}$	0,554	0,506	0,511	0,493
$\eta, \%$	9,198	7,701	8,102	6,550
$I_{об}, \text{А}$	$9,7 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
A	2,29	2,62	2,60	2,80

Таким образом, приведенные экспериментальные данные показывают, что характер и степень изменений фотоэлектрических и электрофизических свойств СЭ зависят от выбранного режима УЗО, т.е., регулируя режим УЗО, можно целенаправленно корректировать параметры СЭ. Это, в свою очередь, дает нам возможность предложить УЗО кремниевых солнечных элементов в качестве эффективной атермической геттерирующей обработки, приводящей к улучшению кремниевых СЭ.

1. Ефимов И.Е. Микроэлектроника. М.: Высшая Школа, 1986, с.200-368.

2. Аморфные металлические сплавы. Под ред. Ф.Е.Люборского. М.: Металлургия, 1987, 620с.

3. Субашиев В.К. // ФТТ, 1960, №2, т.2, с.205-212.

В05 Детекторы рентгеновского излучения на основе легированных монокристаллов CdM_2S_4 ($M = In, Ga$)

¹ Мустафаева С.Н., ² Асадов М.М., ¹ Гусейнов Д.Т.

¹ *Институт физики НАН, Баку, Азербайджан*

² *Институт химических проблем НАН, Баку, Азербайджан*

Выявление новых фоточувствительных материалов-фоторезисторов для рентгеновской, ультрафиолетовой, видимой и ближней ИК-областей спектра является важной задачей физики и техники. Одной из наиболее существенных предпосылок для возникновения рентгенопроводимости является высокая поглощательная способность полупроводникового материала в рентгеновской области спектра. В этом отношении особый интерес представляют высокоомные полупроводниковые материалы, к которым

относятся монокристаллы CdGa_2S_4 и CdIn_2S_4 . Указанные монокристаллы отличаются довольно высоким коэффициентом рентгеночувствительности [1,2]. Однако, как показали эксперименты, рентгенамперные характеристики монокристаллов CdGa_2S_4 и CdIn_2S_4 обнаруживали некоторую инерционность. Было обнаружено, что при отключении рентгеновского излучения уровень темнового тока в образцах устанавливался не сразу, а через 3-6 минут.

Целью настоящей работы явилось изучение влияния легирования медью и железом на рентгендозиметрические характеристики монокристаллов CdGa_2S_4 и CdIn_2S_4 . Монокристаллы $\text{CdGa}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$, $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$, $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Fe}\rangle$ (3 мол.% Cu и Fe) были выращены из синтезированных соответствующих тройных легированных (Cu и Fe) соединений методом химических транспортных реакций с использованием йода в качестве носителя.

В результате изучения влияния легирования медью на рентгендозиметрические характеристики монокристаллов $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$ установлено, что характеристические коэффициенты рентгенопроводимости образцов $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$ в 3-16 раз увеличиваются по сравнению с CdIn_2S_4 при эффективной жесткости излучения 25-50 кэВ мощностью дозы 0,75-78,05 Р/мин. На рис. 1 представлены зависимости коэффициента рентгеночувствительности (K) от мощности дозы рентгеновского излучения для монокристалла $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$ при 300 К и $U=1$ В. При этом инерционность характеристик образцов полностью снимается, а рабочее напряжение питания рентгендетектора на основе $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$ уменьшается в 5 раз.

На рис. 2 приведены рентгенамперные характеристики монокристалла $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Fe}\rangle$ при различных жесткостях рентгеновского излучения. С увеличением V_a величина рентгенотока в образце уменьшалась при всех мощностях дозы E .

При всех значениях V_a рентгенамперные характеристики монокристалла $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Fe}\rangle$ описывались степенным законом $I_r \sim E^a$. При малых уровнях рентгенотока наблюдался более крутой рост I_r по мере увеличения E .

Легированные монокристаллы $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Fe}\rangle$ и $\text{CdGa}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$ также характеризовались безинерционностью рентгендозиметрических параметров.

Таким образом, можно констатировать, что легированные медью и железом (3 мол.% Cu и Fe) монокристаллы CdGa_2S_4 и CdIn_2S_4 могут быть использованы для создания на их основе практически безинерционных рентгендетекторов.

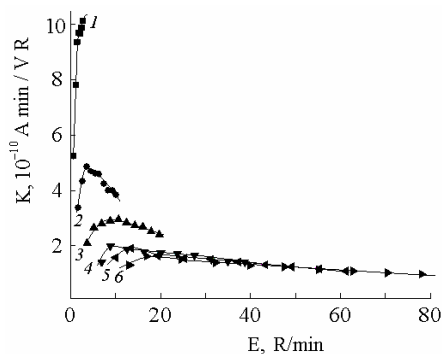


Рис. 1. Дозовые зависимости коэффициентов рентгеночувствительности монокристалла $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle 3 \text{ mol.\% Cu} \rangle$ при различных ускоряющих напряжениях на трубке V_a , keV: 1 - 25; 2 - 30; 3 - 35; 4 - 40; 5 - 45; 6 - 50. $U=1$ В; $T=300$ К.

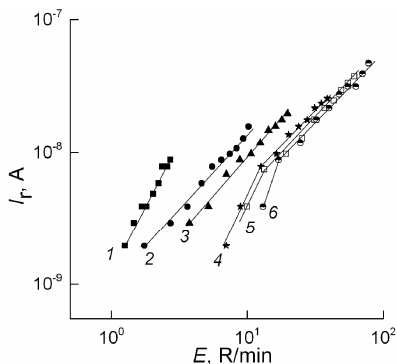


Рис. 2. Рентгенамперные характеристики монокристалла $\text{CdIn}_2\text{S}_4 < 3 \text{ mol.}\% \text{ Fe} >$ при различных жесткостях рентгеновского излучения V_a , keV: 1 - 25; 2 - 30; 3 - 35; 4 - 40; 5 - 45; 6 - 50.

1. Мустафаева С.Н., Асадов М.М., Гусейнов Д.Т. Неорган. Матер. 2010. Т. 46. № 6. С.663-665.

2. Мустафаева С.Н., Асадов М.М., Гусейнов Д.Т. Перспективные материалы. 2010. № 1. С.45-48.

Б06 Модифицирование диэлектрических параметров монокристалла TlGaS_2 под воздействием γ -облучения

¹ Мустафаева С.Н., ² Асадов М.М., ¹ Исмаилов А.А.

¹ *Институт физики НАН, Баку, Азербайджан*

² *Институт химических проблем НАН, Баку, Азербайджан*

Слоистые монокристаллы TlGaS_2 относятся к классу широкозонных высокоомных полупроводников, склонных к политипизму [1,2]. В [1] были изучены частотные зависимости диэлектрических характеристик и проводимости монокристаллов TlGaS_2 и определены основные параметры локализованных состояний. В [2] было изучено влияние γ -облучения на диэлектрическую проницаемость и электропроводность монокристаллов TlGaS_2 в области температур 200-370 К. Изученные в [2] монокристаллы TlGaS_2 по удельному сопротивлению были не такими высокоомными, как в [1], что связано с наличием различных политипов TlGaS_2 . А использование образцов из различных технологических партий приводит к разным результатам. Кроме того, в [2] измерения были проведены в диапазоне частот до 1 МГц. Поэтому, в настоящей работе приведены результаты изучения частотных зависимостей действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') составляющих комплексной диэлектрической проницаемости и ас-проводимости высокоомных ($\rho_{ac} \approx 10^{10} \Omega \cdot \text{см}$) монокристаллов TlGaS_2 вплоть до частоты 35 МГц и влияния на них γ -облучения.

Образцы из TlGaS_2 были изготовлены в сэндвич-варианте с электродами из серебряной пасты. Толщина монокристаллических образцов из TlGaS_2 составляла ~ 220 мкм. Все измерения проведены при 300 К резонансным методом [1]. Исследуемый интервал частот переменного электрического поля составлял $f = 5 \cdot 10^4 - 3,5 \cdot 10^7$ Гц.

γ -облучение образцов проведено на радиационной химической установке непрерывного действия (РХУНД-20000) от источника Co^{60} . Энергия γ -квантов

составляла 1,25 МэВ. Доза облучения накапливалась путем последовательных экспозиций в одном и том же образце. Измерения образцов проводились после каждого облучения.

Изучено влияние γ -облучения на диэлектрические коэффициенты и ас-проводимость поперек слоев монокристалла TlGaS_2 в частотной области $5 \cdot 10^4 - 3,5 \cdot 10^7$ Гц. Показано, что γ -облучение монокристалла TlGaS_2 дозами $5 \cdot 10^4 - 2,15 \cdot 10^6$ рад приводит к незначительному изменению ас-проводимости, действительной составляющей (ϵ') комплексной диэлектрической проницаемости и ощутимому увеличению её мнимой части (ϵ'') при сравнительно низких частотах (рисунок). При высоких частотах сколь-нибудь ощутимого изменения ϵ'' не наблюдалось. В частотной области 50 кГц – 35 МГц ϵ' почти не претерпевала дисперсию, тогда как имела место значительная дисперсия ϵ'' , причем по мере накопления дозы облучения в монокристалле TlGaS_2 дисперсия ϵ'' увеличивалась.

Из высокочастотных диэлектрических измерений определены основные параметры локализованных состояний в монокристалле TlGaS_2 до и после γ -облучения. Из полученного в [1] соотношения

$$N_F^2 = 2.1 \cdot 10^{50} \sigma_{ac}(f) a^{-5}, \quad (1)$$

где σ_{ac} - проводимость на частоте 10^6 Hz, a - радиус локализации, нами вычислена плотность локализованных вблизи уровня Ферми состояний (N_F) до и после γ -облучения образцов TlGaS_2 . При $D_\gamma = 0 - 2.15 \cdot 10^6$ рад $N_F = (7,0 - 8,4) \cdot 10^{18}$ эВ $^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$. При вычислении N_F значение радиуса локализации взято равным 14 \AA [1].

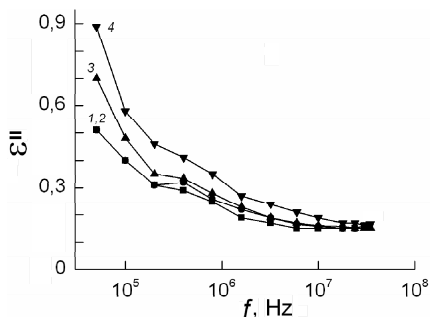


Рисунок. Дисперсионные кривые мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости монокристалла TlGaS_2 до (кривая 1) и после γ -облучения дозами D_γ , рад: 2 - $5 \cdot 10^4$; 3 - $1,5 \cdot 10^5$; 4 - $2,15 \cdot 10^6$.

По формуле [3]:

$$R = \left(\frac{a}{2} \right) \ln(v_{ph} \cdot \tau), \quad (2)$$

(где τ – среднее время прыжка) вычислены средние расстояния прыжков в монокристалле TlGaS_2 до и после γ -облучения. Если до γ -облучения среднее значение R составляло 81 \AA , то по мере накопления дозы γ -облучения R уменьшалось до 78 \AA .

Значения τ , определенные из экспериментальных зависимостей $\sigma_{ac}(f)$ в TlGaS_2 , составляли 10^{-7} с до γ -облучения и $6,7 \cdot 10^{-8}$ с после γ -облучения дозой $2,15 \cdot 10^6$ рад. То есть после γ -облучения TlGaS_2 значения τ и R уменьшаются.

Оценен энергетический разброс локализованных вблизи уровня Ферми состояний [3]:

$$\Delta E = \frac{3}{2\pi R^3 \cdot N_F} \quad (3)$$

Полученные значения ΔE до и после γ -облучения монокристалла TlGaS_2 лежали в интервале 0,12-0,13 эВ.

1. Мустафаева С.Н. ФТТ. **46**, 6, 979 (2004).

2. Шелег А.У., Иодковская К.В., Курилович Н.Ф.. ФТТ **45**, 1, 68 (2003).

3. Мотт Н, Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах.

Мир, М.

(1974) 472 с.

B07 Усиление фотоотклика ИК конвертера ионизационного типа (Amplification of photoresponse in the ionization type IR converter)

B.G. Salamov ^{1,3}, V.I. Orbukh ², N.N. Lebedeva ² and S. Ozturk ¹

¹ *Physics Department, Faculty of Sciences, Gazi University, Ankara, Turkey*

² *Baku State University, Institute for Physical Problems, Baku, Azerbaijan*

³ *National Academy of Science, Institute of Physics, Baku, Azerbaijan*

In the last decade intensively studied physical processes in one-dimensional nanotubes and nanoporous objects [1]. Interest related to the practical application of carbon nanotubes and the porous silicon. In porous dielectrics a self-sustaining electronic emission has been enhanced by a electrical field that finds application in electro-optical IR image converters was investigated. A classic representative of nanoporous materials are zeolites [2]. The pores of zeolite form inside of crystals the network through channels [3], therefore zeolites can be considered as an object, on which it is possible to investigate multiplication of electrons, porous emission and gas discharge in the pores. Our studies of natural zeolite (clinoptilolite) with through-pores [4] at low pressure and a constant electric field shown that in the pores of the zeolite plate occurs an active multiplication of electrons due to changes in the ionization potential and other parameters of the gas discharge. Gas discharge in the pores provides enhanced emission of electrons into the gas gap [5].

Earlier investigated by us in [6-8] the photoionization type IR image converter is a plane gas-discharge cell, where the cathode is a high-ohmic ($\rho=10^7$ Ohm-cm) plate of photosensitive GaAs. A narrow gap (40-60 μm) between the cathode and anode covered with high quality phosphor screens filled with gas at a residual pressure (60-100 Torr). When projecting image on the outer surface of the GaAs, in volume of the semiconductor and the gas gap a nonuniform distribution of the current, gas discharge light emission in the gap and intensity of the phosphorescent glow is formed. The intensity of the gas discharge light emission and phosphorescent glow is determined by intensity of the electrons emitted from the semiconductor surface and amplified in the gas discharge.

At this situation the increasing of the contrast transfer's coefficient is observed. For increase the flow of electrons we used a plate of nanoporous zeolite on the semiconductor surface toward the gas. However, the image resolution is disturbed due to the inhomogeneity of the zeolite plate. Therefore we have replaced it with zeolite powder in which such

inhomogeneity is not observed. However, the stationar conductivity of the pure zeolite powder is approach to zero because the high resistivity one. After several experiments we found that the addition of 10% copper powder in a zeolite powder restores its suitability as a current amplifier. Electrons in the zeolite powder are supplied by emission from the surface of the metallic particles. Multiply in the pores, the electrons provide much greater discharge current than in the absence of zeolite powder on the semiconductor surface. Thus, the structure of a "photosensitive semiconductor cathode coated with zeolite powder - the gas gap" is able to increase the contrast transfer's coefficient without image distortion.

Acknowledgments: This work is supported by Gazi University BAP research project 05/2011-23.

- [1] H.S. Nalwa (ed.) *Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices* Vol. 6, Academic Press, San Diego, 2001.
- [2] <http://www.iza-structure.org/databases/>
- [3] J. Sauer, F. Marlow, F. Schüth, in: H.S. Nalwa (ed.), *Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices* Vol. 6, Academic Press, San Diego, 2001, Chapter 5, pp 153-171.
- [4] N.N. Lebedeva, V.I. Orbuh, T.Z. Kulyeva, Ch.A. Sultanov, *Transaction Phys. & Astronomy*, v. **XXIX**, № 5, 162-165, 2009
- [5] N.N. Lebedeva, V.I. Orbukh, Ch.A. Sultanov, *Technical Physics*, V. **55**, № 4, 565–568, 2010
- [6] B.G. Salamov, N.N. Lebedeva, B.G. Akinoglu, K. Allakhverdiev, *J. Phys. D*, **27**, 1229, 1994
- [7] N.N. Lebedeva, B.G. Salamov, V.I. Orbukh, V.M. Nagiev, *Instrum. & Exp. Tech.* **37**, № 5, Part 2, 642, 1994
- [8] V.I. Orbukh, N.N. Lebedeva, B.G. Salamov, *Semiconductors*, **43**, №10, 1329-1332, 2009

Б08 Функциональные материалы на основе халькогенидных наночастиц

Джафаров М.А., Насиров Э.Ф. Мамедова С.А.

Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан

Стремительный прогресс твердотельной электроники и стремление к миниатюризации ее функциональных устройств стимулируют интенсивное развитие нового направления современного материаловедения – нанотехнологий. В частности, в последнее время значительное внимание уделяется разработке методов синтеза наноразмерных полупроводников. Интерес к синтезу малых частиц, кластеров, нанокристаллов различных веществ существенно вырос, когда обнаружилось, что уменьшение размеров кристаллитов ниже некоторой пороговой величины может приводить к значительному изменению кристаллической структуры и появлению квантовых свойств. Благодаря квантовым свойствам наночастиц появилась новая важная область их применения - производство современных микроэлектронных устройств с нанометровым размером элементов. Для новейших наноразмерных элементов - квантовых точек - предполагается использовать наночастицы халькогенидов тяжелых металлов.

Для получения ZnSe, CdTe и CdS в настоящей работе применяли метод химического осаждения из водных растворов. Этот метод имеет преимущества перед другими известными методами синтеза сульфидов. Так, метод химического осаждения из водных растворов позволяет получать полупроводниковые нанокристаллы намного

меньшего размера, чем методы молекулярно-лучевой эпитаксии или литографии. Образование зародышей и их рост в растворе при химическом осаждении приводит к форме нанокристаллитов, близкой к сферической, которой очень важна для достижения оптимального дискретного спектра энергетических уровней квантовых точек. Метод химического осаждения основан на взаимодействии растворимых комплексных соединений цинка или кадмия с тиоамидами, такими как диамид тиоугольной кислоты и его производные.

Проведен всесторонний анализ процессов комплексообразования в растворе и выяснено их влияние на механизм осаждения сульфидов, теллуридов и селенидов. Удалось установить физико-химическую природу процессов, протекающих при формировании нанокристаллических пленок и построить физико-химическую модель образования твердых растворов с катионным и анионным замещением и найдена корреляционная взаимосвязь «комплекс - условия – степень нанокристалличности - свойства». По результатам исследований подобраны оптимальные режимы для получения перспективных тонкопленочных материалов на основе сульфоселенидов и селенидотеллуридов для наноэлектроники. В том числе, разработаны технологические режимы осаждения наночастицы и пленок ZnSe и CdS электронной и дырочной проводимости и выяснена природа твердофазных взаимодействий в этих слоях. Дополнительно были изучены фазовый состав и кристаллическая структура порошков, полученных методом химического осаждения. Рентгенограммы были измерены для исходного (после осаждения) нанокристаллического порошка ZnSe и CdS и для того же порошков после отжига при температурах до 600°C в течение 2 ч. Для оценки надежности результатов по размерам частиц, определенным из рентгенодифракционных данных, были проведены электронно-микроскопические исследования части полученных порошков. Этим методом удалось показать, что крупные частицы CdS, состоят из множества мелких монокристаллических частиц размером около 6 нм, т.е. крупные частицы являются агломератами. Рассмотрен синтез сульфидов металлов из водных растворов в виде осадков, тонких поликристаллических пленок и нанокристаллов в гелевых матрицах. Показано влияние равновесных процессов на кинетические параметры синтеза. Установлено существенное влияние на области выделения сульфидов металлов трех условий насыщенности растворов. Созданы математические модели процессов синтеза металлосульфидов и продукты на их основе. Металлосульфиды в виде тонких пленок и нанокристаллов не могут существовать соответственно без инертных подложек и гелевых матриц вследствие чего эти системы названы металлосульфидными имплантатами.

Формирование тонких слоев методом осаждения из водного раствора происходит в неравновесных условиях, что сказывается на образовании менее совершенной структуры по сравнению с массивными образцами. На это указывает несколько заниженные значения плотности пленок и рассчитанные значения подвижности носителей тока. Однако, подбором условия осаждения и термической обработки достигнуты режимы получения без легирующей примеси пленок твердых растворов более эффективных по фотоэлектрическим параметрам. Используемый метод осаждения пленок позволяет расширить область твердофазной растворимости в анионной подрешетке по сравнению с массивными образцами.

Использование алюминиевых подложек позволяет благодаря присутствию Al_2O_3 создать более плотную поверхность пленки. Структурное состояние осажденных в работе пленок детально исследовалось с помощью дифракции рентгеновских лучей и нейтронов. Рентгенограммы были получены на дифрактометре Дрон-4 в интервале углов 20 - 100 градусов с шагом 0,02 градуса и временем накопления сигнала в точке 5 сек. Использовали медное излучение с применением пиролитического графита в качестве монохроматора для выделения $Si_{ка}$ - дублета из сплошного спектра.

Электронно-микроскопические исследования пленок выполнены с помощью растрового электронного микроскопа.

Для структурных исследований осадков, полученных при синтезе индивидуальных сульфидов металлов и твердых растворов на их основе, была привлечена лазерная КР спектроскопия. Для изучения морфологии пленок сульфидов металлов проводили исследование их поверхности сканирующим зондовым микроскопом в режиме контактной атомно-силовой микроскопии (АСМ). Размер микрокристаллитов определяли по данным электронно-микроскопических исследований и по результатам рентгеновских исследований с использованием формулы Селякова - Шеррера. Измерение фотоэлектрических характеристик пленок с предварительно нанесенными на их электрохимическим способом никелевыми контактами проводили на специально разработанном измерительном стенде. Исследованы свойства фотолюминесценции наноструктурированных частицами CdS ($d = 2,8$ нм) пленок пористого Si. Показано, что осаждение наночастиц CdS на пленки пористого Si приводит к сдвигу спектра фотолюминесценции наночастиц, покрытых поверхностью активным веществом, в коротковолновую область.

Технология осаждения пленок халькогенидов различных металлов химическим и электрохимическим методами открывает широкие перспективы при направленном синтезе наноразмерных пленок и получении наночастиц со сферической симметрией и смешанных наноматериалов.

Б09 Морфология поверхности, электрофизические и фотоэлектрические свойства эпитаксиальных пленок узкозонных халькогенидов $A^{IV}B^{VI}$

Нурiev И.Р.

Институт физики НАН, Баку, Азербайджан

Известно, что современные электронные приборы создаются на поверхности кристаллов и приборы с высокими параметрами изготавливаются на однородно-чистых, зеркально гладких поверхностях. Для этой цели широко используются структурно совершенные эпитаксиальные пленки полупроводников. Все структурные изменения, происходящие в тонких приповерхностных слоях, отражаются на характеристиках приборов изготовленных на их основе. По этой причине современная электронная техника требует получения совершенных эпитаксиальных пленок с заданными свойствами, свободных от различного рода нежелательных поверхностных состояний. Поэтому исследование морфологии поверхности эпитаксиальных пленок в корреляции с электрофизическими и фотоэлектрическими свойствами представляет научный и практический интерес.

Полупроводниковые соединения группы $A^{IV}B^{VI}$ и твердые растворы на их основе, в которых можно плавно регулировать ширину запрещенной зоны путем изменения их состава, нашли широкое применение при изготовлении инжекционных лазеров и фотодиодов ИК излучения. Разработан ряд методов получения структурно совершенных однородных эпитаксиальных пленок с заданными толщиной, составом и концентрацией носителей.

В данной работе рассматриваются особенности морфологии поверхности эпитаксиальных пленок узкозонных халькогенидов $A^{IV}B^{VI}$, которые широко применяются в ИК технике и обладают большой перспективой. Анализируется морфология поверхности эпитаксиальных пленок халькогенидов серебра и твердых растворов на их основе, выращенных на различных подложках, методами термического напыления и обобщены полученные результаты. Пленки толщиной $0,05 \pm 1$ мкм, в

основном выращены на свежесколотых гранях (111) BaF_2 , методом конденсации молекулярных пучков (КМП) и «горячей стенки» (ГС) в вакууме 10^{-4} и 10^{-7} Па соответственно. Большой перспективой обладают эпитаксиальные пленки, выращенные в сверхвысоком вакууме методом ГС. Характерной особенностью метода ГС является то, что рост эпитаксиальных слоев происходит в условиях, максимально близких к термодинамическому равновесию при минимальных потерях материала. ГС служит для направления молекул от источника к подложке. Метод ГС позволяет получать эпитаксиальные пленки с совершенной структурой и высокими значениями электрофизических параметров.

Пленки получены на сверхвысоковакуумной установке с безмасляной откачкой, разработанной и внедренной в институте Фотоэлектроники (ныне Физики) НАН Азербайджана. В качестве откачной системы использовался сверхвысоковакуумный агрегат СВА-0,25. Амбула, используемая в данной установке содержит два источника, один для халькогенидов свинца и их твердых растворов (основного), а другой для элемента Te, Se (компенсирующего) и подложкодержателя с подложкой, обеспеченной заслонкой.

Выбор в качестве подложки монокристаллов BaF_2 , продиктован их оптической прозрачностью в спектральном диапазоне $3\div 12$ мкм, хорошей механической прочностью и химической инертностью.

Исследование поверхности проводилось на малогабаритном растровом электронном микроскопе. Показано, что на поверхности исследованных пленок, $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ наблюдаются черные скопления, которые являются продуктами окисления, образующиеся в процессе роста, количество и размер которых отличается в зависимости от метода получения.

Установлено, что количество и размер скоплений на поверхности пленок полученных методом КМП больше, чем методом ГС. Этот факт свидетельствует о том, что морфология поверхности пленок сильно зависит от степени вакуума и действительно наблюдающиеся черные скопления, являются продуктами окисления. Пленки с черными скоплениями на поверхности, имеют малые значения электрофизических параметров ($\mu_{77\text{K}}=(1,5\div 2,0)\cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$).

С применением дополнительного компенсирующего источника паров халькогена, в процессе роста, удалось получить структурно совершенные пленки халькогенидов $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ с чистой, гладкой поверхностью свободных от черных скоплений. Эти пленки имеют оптимальные значения электрофизических и фотоэлектрических параметров необходимых для создания на их основе высокочувствительных оптоэлектронных приборов, применяемых в различных областях ИК техники.

Показано, что подвижность носителей заряда пленок сильно зависит от морфологии поверхности. Пленки с чистой поверхностью имеют высокие значения подвижности ($\mu_{77\text{K}}=(2,5\div 3)\cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$). В едином технологическом цикле без нарушения вакуума, созданы *p-n* гомо и гетеропереходы на основе полученных пленок, которые оказались фоточувствительными при температуре жидкого азоте (77 К). Проведением сравнения и обобщения полученных результатов, установлено, что образование черных скоплений на поверхности эпитаксиальных пленок, выращенных методами термического напыления, характерно для халькогенидов $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ и морфология поверхности сильно влияет на электрофизические и фотоэлектрические свойства.

Б10 Морфология поверхности и фотоэлектрические свойства эпитаксиальных пленок $Pb_{1-x}Mn_xTe$ (Se) подвергнутых радиационному облучению

¹ Садыгов Р.М., ¹ Нуриев И.Р., ¹ Гаджиев М.Б., ² Мамишова Р.М., ² Керимова Т.И.

¹ *Институт физики НАН, Баку, Азербайджан*

² *Институт радиационных проблем НАН, Баку, Азербайджан*

В связи с возрастающим интересом к инфракрасной технике и космическим исследованиям становится актуальным поиск радиационно-стойких материалов различного типа и разработка оптоэлектронных приборов на их основе. Особый интерес представляют соединения типа $A^{IV}B^{VI}$ и твердые растворы на их основе. Наличие в кристаллической решетке полупроводников такого типа элемента тяжелых атомов (свинец, олово) обеспечивает высокую радиационную устойчивость изготовленных на их основе приборов.

Указанные полупроводники в течение долгого времени широко применяются в приборах ИК техники, работающих в области длин волн $3\div 5$ и $8\div 14$ мкм. Разработаны технологии получения эпитаксиальных пленок этих материалов, с высоким кристаллическим совершенством, на различных подложках. Одними из материалов, относящихся к группе $A^{IV}B^{VI}$, являются эпитаксиальные пленки твердых растворов $Pb_{1-x}Mn_xTe(Se)$. Ввиду того, что современные оптоэлектронные приборы создаются, в основном на поверхности кристаллов, при изготовлении таких приборов большое значение приобретает диагностика поверхности.

Отслеживание изменений, происходящих на поверхности под воздействием гамма-излучения с учетом влияния на фотоэлектрические свойства и выбор эксплуатационных характеристик диодов, изготовленных на основе этих материалов, представляет научно-практический интерес.

Проведено АСМ исследование морфологии поверхности эпитаксиальных пленок $Pb_{1-x}Mn_xTe$ (Se) ($x=0.03$) подвергнутых γ -облучению, полученных, на свежесколотых гранях (111) BaF_2 , методом конденсации молекулярных пучков (КМП).

Одинаковая кристаллическая структура и близость параметров решеток подложки и пленок (структура кубическая; $a_{BaF_2}=6,19 \text{ \AA}$; $a_{Pb_{1-x}Mn_xTe}=6,43 \text{ \AA}$; $a_{Pb_{1-x}Mn_xSe}=6,10 \text{ \AA}$) позволило вырастить структурно совершенные эпитаксиальные пленки указанных твердых растворов.

На атомно-силовом микроскопе (АСМ) отслежены исходные поверхности эпитаксиальных пленок и изменения, происходящие на поверхности этих материалов после воздействия гамма - облучения. С целью выявления динамики морфологических изменений поверхности и изучения пострадиационных эффектов изучены трехмерные (3d) поверхностные изображения и их гистограммы (кривые распределения элементов поверхностных изображений по размерам) эпитаксиальных пленок n типа проводимости.

Пленки облучались дозой $D_\gamma=5-35 \text{ кГр}$ на установке MRX γ -25 с изотопным источником Co^{60} ($E=1,25 \text{ МэВ}$). Мощность дозы поглощения источника составляла $dD_\gamma/dt=0,40 \text{ Гр/с}$. Пленки, до и после гамма-облучения, исследовались на атомно-силовом микроскопе СЗМУ-Л5. Получены трехмерные изображения поверхности и кривые распределения элементов поверхностных изображений по размерам-гистограммы для исходных и подвергнутых воздействию γ -излучения образцов (рис.1,2).

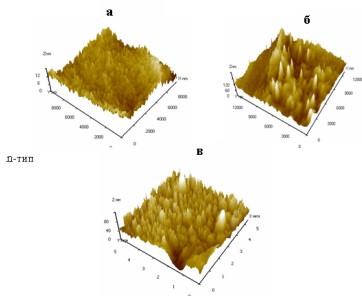


Рис. 1. Трехмерные АСМ- изображения поверхности эпитаксиальных пленок $Pb_{1-x}Mn_xSe$ ($x=0,03$) n -типа до (а) и после γ -облучения $D_\gamma=10$ (б), 25 кГр(в)

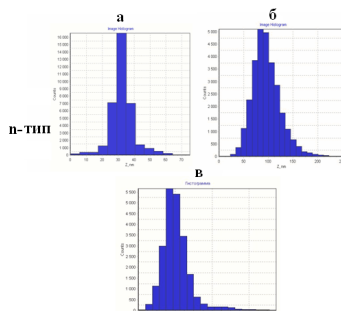


Рис. 2. Гистограммы АСМ- изображения поверхности эпитаксиальных пленок $Pb_{1-x}Mn_xSe$ ($x=0,03$) n -типа до (а) и после γ -облучения $D_\gamma=10$ (б), 25 кГр(в)

Как видно из трехмерных изображений, поверхности исходных (необлученных) образцов характеризуются наличием равномерно распределенных структурных (биографических) дефектов, обусловленных предисторией получения эпитаксиальных пленок. Установлено, что после гамма-облучения эпитаксиальных пленок дозой $D_\gamma=10$ кГр в образцах n -типа на поверхности образуются нанокластеры, высота которых превышает исходных на порядок и составляет 120 нм. При этом гистограммы пленок характеризуются наличием наночастиц с размерами от 50 до 150 нм. Выявлено, что выше 35 кГр нарушается радиационная стойкость этих пленок.

Рассмотрено влияние γ -излучения на фоточувствительность исследованных пленок. Изучены спектральные зависимости фотопроводимости эпитаксиальных пленок до и после облучения.

Показано, что малые дозы облучения не приводят к изменению фоточувствительности. С ростом дозы γ -квантов величина чувствительности в максимуме спектральной характеристики заметно возрастает.

Б11 Получение твердых растворов $TlIn_{1-x}Dy_xS_2$ и исследование их фотопроводимости

Керимова Э.М., Гасанов Н.З., Гасанов А.И., Гусейнова К.М.

Институт физики НАН, Баку, Азербайджан

Дебаграммы синтезированных методом Бриджмена и растертых в порошок образцов $TlIn_{1-x}Dy_xS_2$ ($x=0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,10$) получали на CuK_α излучении. Установлено, что полученные образцы $TlIn_{1-x}Dy_xS_2$ однофазны, и все дифракционные отражения однозначно индицируются на основе моноклинной β -фазы $TlInS_2$ с параметрами элементарной ячейки, приведенными в [1]. Частичное изовалентное замещение атомов In на Dy в $TlInS_2$ приводит к уменьшению интенсивности дифракционных отражений и изменению параметров элементарной ячейки $TlIn_{1-x}Dy_xS_2$.

В твердых растворах переменного состава с ростом значения x параметры элементарной ячейки заметно уменьшаются, их зависимость от x имеет линейный характер (рис.1). Понижение значений параметров элементарной ячейки до 4,6%, возможно, связано с различием ионных радиусов атомов In (0,88 Å) и Dy (0,92 Å), статистически заселенных в тетраэдрических и октаэдрических пустотах структуры $TlInS_2$.

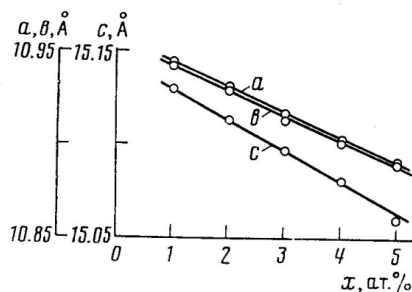


Рис.1. Изменение параметров элементарной ячейки $TlIn_{1-x}Dy_xS_2$ в зависимости от x .

Исследования фотопроводимости проводились на монокристаллах, в которых концентрация легирующей примеси контролировалась рентгеноспектральным анализом на установке «Сомебах». Получены кривые спектрального распределения фотопроводимости монокристаллов $TlInS_2$ и $TlIn_{1-x}Dy_xS_2$ при 300 и 77К (рис.2). Ширина запрещённой зоны E_g вычислена по положению полупеака максимума фототока с учетом спектрального распределения. Найденные значения E_g для монокристаллов $TlInS_2$ равны 2,38 и 2,61 эВ, а для монокристаллов $TlIn_{1-x}Dy_xS_2$ - 1,8 и 1,9 эВ, соответственно, при 300 и 77 К. Наблюдается расширение спектральной области фоточувствительности в длинноволновую область.

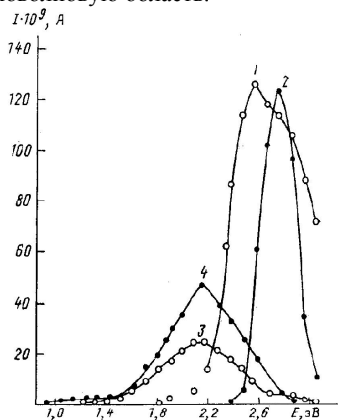


Рис.2. Кривые спектрального распределения фотопроводимости монокристаллов $TlInS_2$ (1,2) и $TlIn_{1-x}Dy_xS_2$ (3,4) при 300 (1,3) и 77 К (2,4).

Фотоэлектрические исследования в диапазоне 1,3-0,3 мкм показали, что при комнатной температуре в спектральных кривых фотопроводимости появляются примесные пики, обусловленные ионами РЗЭ. С изменением состава максимум фотопроводимости смещается. Кристаллы $TlIn_{1-x}Dy_xS_2$ имеют область фоточувствительности 1,2-0,38 мкм при температуре 300 К.

[1] Müller D., Poltman F., Hahn H. Zur Struktur Ternare Chalkogenides Thalliums mit Aluminium, Gallium und Indium // Z. Naturforsch. B, 1974, V. 29, № 1-2, S. 117-118.

Б12 Особенности преобразователя ИК изображений ионизационного типа на основе полупроводниковой пленке с высоким сопротивлением (Features of an ionization type IR image converter based on high resistivity semiconductor film)

K. Aktas¹, S. Acar¹, B.G. Salomov^{1,2*} and F. Dagdelen³

¹ *Physics Department, Faculty of Sciences, Gazi University Ankara, Turkey*

² *National Academy of Science, Institute of Physics, Baku, Azerbaijan*

³ *Department of Physics, Faculty of Arts and Sciences, Firat University, Elazığ, Turkey*

CuInSe₂ (*CIS*) is a ternary compound semiconductor that crystallizes in the chalcopyrite crystal structure. It has a direct energy gap at ~1 eV and an absorption coefficient of $>10^3 \text{ cm}^{-1}$, as well as good outdoor stability. *CIS* films could be applied to image pickup devices, as well as solar cells, since high efficient thin-film photoconductors are known to be useful in the photoconductive imaging [1,2]. Application of the *CIS*-based thin film as a target for rapid visualization of image formation on the IR photocathode in an ionization type IR image converter has been demonstrated. A photoelectric conversion device has a high S/N ratio and can increase the detection efficiency even under a low luminance. The photoelectric conversion device generates an increased electric charge by impact ionization in a photoelectric conversion unit formed from a chalcopyrite type semiconductor, so as to improve dark current characteristic. However, change in the electron emission properties of photocathodes under the action of gas-discharge plasma may be undesirable, as it leads to instabilities of discharge parameters in time.

Therefore, the effect of non-thermal plasma treatment on the structural, optical and electrical properties of *CIS* thin films is investigated. The films have been characterized using atomic force microscopy, X-ray diffraction, absorbance and electrical measurements. Our results also show that the plasma treatment plays important role on the electrical and optical properties of *CIS* films. It is found that with the treatment of plasma, the band gap energy values decrease from 1,05 to 0,88 eV. Thus the resistivity values of *CIS* films at room temperature decreases by three orders of magnitude after the plasma treatment. The quality of the film has been analyzed using both the profile and spatial distributed discharge light emission intensity data showing the surface inhomogeneity and damage in the thin film as function of time. The optimization of the imaging devices also gets a great importance in order to acquire the critical values of physical parameters for the elimination of the damages. However, when working with the polycrystalline thin film instead of single crystal, one has to be careful to control the system parameters as the film can be damaged easily. The detection efficiency of an ionization type IR image converter can be increased effectively by reducing the thickness of the photocathode.

Acknowledgements: This work was supported by the Gazi University BAP research projects **05/2011-23 and 05/2011-60**.

[1] P.D. Paulson, M.W. Haimbodi, S. Marsillac, R.W. Birkmire and W.N. Shafarman, *J. Appl. Phys.* 91, 10153, 2002

[2] M. Gloeckler, J.R. Sites and W. K. Metzger, *J. Appl. Phys.* 98, 113704, 2005

Б13 Фотодиод с мультиколлектором

Алиев А.А., Раджабли А.А., Кулиев Ш.М., Мамедов А.К.

Институт физики НАН, Баку Азербайджан

Предлагается конструкция фотодиода с базой большой площади, в которой создано несколько параллельно соединенных между собой коллекторных переходов малой площади.

Проведены расчеты диффузионной, генерационно-рекомбинационной и туннельных составляющих темнового тока, емкости, дифференциального сопротивления и основных параметров фотодиодов на основе $Cd_{1-x}Hg_xTe$ с базой p и n типа проводимости при различных соотношениях расстояния между p - n переходами, скорости поверхностной рекомбинации, длины свободного пробега и времени жизни неосновных носителей заряда.

Показано, что в данной конструкции возможно добиться значительного снижения темнового тока, особенно его генерационно-рекомбинационной и туннельных составляющих, а также емкости фотодиода и повысить фотоэлектрические параметры.

Основными параметрами фотодиодных детекторов ИК-излучения являются вольтовая (либо токовая) чувствительность и обнаружительная способность:

$$R = \frac{U_s}{P} = \frac{J_s R_d A}{P}, \quad D^* = \frac{\eta \lambda e}{2hc} \left(\frac{R_d A}{kT} \right)^{1/2} \quad (1)$$

где U_s , J_s - напряжение и плотность тока сигнала соответственно, P - падающая мощность, R_d - дифференциальное сопротивление диода, η - квантовый выход.

Как видно из указанных соотношений, эти параметры во многом определяются дифференциальным сопротивлением барьерной структуры, которое в свою очередь зависит от темнового тока.

Темновой ток состоит из нескольких компонент, определяющихся различным происхождением – диффузионной, генерационно-рекомбинационной и туннельных. Во многих случаях значительную роль играет также и шунтирующее сопротивление базы.

Еще один из параметров, частотная характеристика, играющая значительную роль, особенно при работе в гетеродинном режиме, зависит не столько от времени жизни неравновесных носителей заряда, сколько от времени пролета до перехода, а также граничной частоты RC -цепочки перехода.

В связи с этим одной из основных проблем при создании фотодиодов является снижение темнового тока и емкости при обратном рабочем напряжении, которые препятствуют повышению их основных параметров.

Темновой ток, а следовательно дифференциальное сопротивление и емкость диода прямо пропорциональны площади перехода. Следовательно, уменьшив площадь перехода, можно в определенной степени улучшить и фотоэлектрические параметры фотодиода.

Исходя из этого, предлагается конструкция фотодиода с базой большой площади, в которой создано несколько параллельно соединенных между собой коллекторных переходов малой площади. В этом случае темновой ток будет представлять из себя сумму темновых токов, протекающих через каждый коллекторный переход в отдельности. Поэтому достаточно определить темновой ток через один из переходов, а затем просуммировать на их количество.

При дальнейшем рассмотрении принимается:

– толщина базовой области такова, что все падающее излучение поглощается в базе;

- толщина базы меньше длины свободного пробега неосновных носителей и все они достигают области перехода;
- падение напряжения происходит только в обедненной области;
- толщина и площадь коллектора намного меньше толщины и площади базовой области.

При таких условиях источником генерационно-рекомбинационных и туннельных токов будет только объем обедненной области. Следовательно, эти составляющие темнового тока будут во столько раз меньше, во сколько раз суммарная площадь коллекторных переходов меньше общей площади фотодиода.

Однако в большинстве современных фотодиодов основную роль играет диффузионный ток, источником которого является весь объем базы. Поэтому, необходимо рассмотреть, как изменится диффузионный ток.

Гримберген, рассматривая подобную задачу, для коллектора в виде окружности вычислял диффузионный ток, состоящий из двух компонент – обычной, генерируемой в области базы под переходом, и второй компоненты, возникающей за счет собирания носителей из областей по бокам перехода.

Боковая составляющая прямо пропорциональна отношению модернизированных функций Бесселя второго рода первого и нулевого порядка от аргумента, равного отношению радиуса коллектора к длине свободного пробега неосновных носителей заряда.

Расчеты, проведенные для фотодиодов на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ с базой p и n типа проводимости при различных соотношениях расстояния между p - n переходами, скорости поверхностной рекомбинации, длины свободного пробега и времени жизни неосновных носителей заряда показывают, что при определенных условиях суммарный диффузионный ток будет меньше, чем у планарного диода с одним коллекторным переходом на всю площадь фотодиода.

Учитывая уменьшение и других компонент темнового тока, таким образом можно добиться увеличения дифференциального сопротивления.

Кроме того, так как шум некоррелирован, то в такой конструкции с n коллекторами, шумы, уменьшатся, а следовательно такие важнейшие параметры фотодиода как обнаружительная способность и NEP увеличатся в $n^{1/2}$ раз.

Оценки основных фотоэлектрических параметров диодов в предложенной конструкции, также подтверждают перспективность такой конструкции.

Б14 Расчёт энергетического спектра квантовой ямы $Cd_{0,8}Hg_{0,2}Te/Cd_{0,24}Hg_{0,76}Te$ (12,5 нм) по спектральным характеристикам фотолюминесценции

¹ Войцеховский А.В., ¹ Горн Д.И., ² Ижнин И.И., ² Ижнин А.И.

¹ *Томский государственный университет, Томск, Россия*

² *Научно-производственное предприятие «Карат», Львов, Украина*

Данная научная работа посвящена исследованию спектров люминесценции структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) с одиночной КЯ со значениями состава x в яме, пригодными для разработки на их основе фотоприёмных и светоизлучающих устройств, работающих в среднем и дальнем ИК-диапазоне.

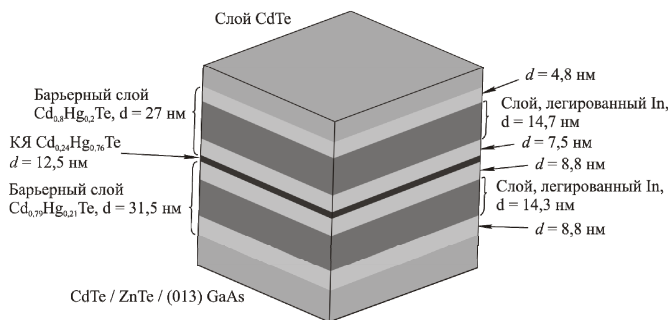


Рисунок 1 – Схематическое изображение исследуемой гетероэпитаксиальной структуры на основе КРТ с одиночной КЯ

В работе проводились экспериментальные исследования структуры КРТ с одиночной КЯ, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в Институте физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск), а также проведён теоретический анализ полученных спектров. Схематическое изображение исследуемой гетероструктуры представлено на рис. 1. Для исследования параметров КЯ нами анализировались спектры излучения исследуемой структуры при оптической накачке. Детальное описание данной структуры, а также экспериментальной методики и применяемой расчётной модели было дано нами в [1].

Результаты измерения спектра фотолюминесценции приведены на рисунке 2. Спектральный диапазон используемого в эксперименте монохроматора (0,7-6,5 мкм) позволяет проводить исследования излучения, испущенного образцом, в ближнем и среднем ИК-диапазонах. Предварительные оценки энергий оптических переходов показали, что данный монохроматор не позволяет наблюдать межподзональные переходы электронов и дырок в исследуемой структуре. Следовательно, заранее был сделан вывод о том, за наблюдаемые в эксперименте пики люминесценции будут ответственны межзональные переходы.

Исходя из анализа расчётных данных, приведённых на рисунке 2, а также принимая во внимание правила отбора для межзональных переходов в КЯ, можно сделать вывод о том, что наблюдаемые в эксперименте пики люминесценции 2 и 3 соответствуют переходам в КЯ $c_2 \rightarrow hh_2$ и $c_2 \rightarrow hl_2$, соответственно. Здесь c_1 , c_2 – 1-й и 2-й уровни размерного квантования электронов в зоне проводимости, hh_1 , hh_2 , hl_1 , hl_2 – 1-й и 2-й уровни размерного квантования тяжёлых и лёгких дырок в валентной зоне, соответственно. Интерпретация увеличения интенсивности излучения в области 0,19-0,27 эВ затруднена, однако, в данном интервале энергий согласно расчётным данным мы имеем два перехода между уровнями размерного квантования в КЯ – переходы $c_1 \rightarrow hl_1$ и $c_1 \rightarrow hh_1$. Следовательно, можно сделать предположение о том, что указанное возрастание интенсивности излучения также обусловлено размерным квантованием.

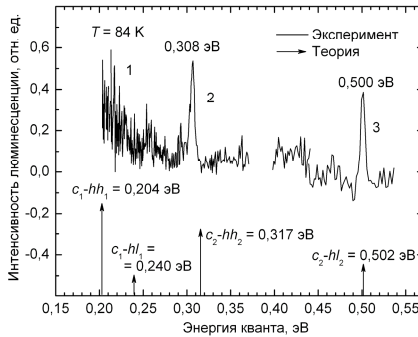


Рисунок 2 – Спектр фотолюминесценции структуры с одиночной КЯ $\text{Cd}_{0,8}\text{Hg}_{0,2}\text{Te} / \text{Cd}_{0,24}\text{Hg}_{0,76}\text{Te}$ (12,5 нм) / $\text{Cd}_{0,79}\text{Hg}_{0,1}\text{Te}$ при $T=84$ К

Таким образом, проведённые оценки позволяют идентифицировать наблюдаемые в эксперименте пики люминесценции, как обусловленные межзонной излучательной рекомбинацией в КЯ. На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что использованная нами в расчётах теоретическая модель даёт возможность производить расчёты положения уровней размерного квантования в структурах с квантовыми ямами, вполне согласующиеся с экспериментальными данными.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИФП СО РАН г. Новосибирска Ю.Г. Сидорову, С.А. Дворецкому, В.С. Варавину, Н.Н. Михайлову, М.В. Якушеву за предоставленные гетероструктуры КРТ методом МЛЭ.

Литература

1. Горн Д.И. Исследование спектров фотолюминесценции гетероструктур КРТ с квантовыми ямами / Д.И. Горн, А.В. Войцеховский, И.И. Ижнин // Изв. вузов: Материалы электронной техники. – 2011. – № 3. – С. 26–29.

Б15 К теории магнитных спиновых флуктуаций в высокотемпературных сверхпроводниках, используемых в ИК-приемниках

¹ Креопалов Д.В., ² Савченко А.М.

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

² МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия

Создание ИК-приемников на основе высокотемпературных сверхпроводников с высоким значением критической температуры является актуальной задачей для современной фотоэлектроники.

Работа посвящена исследованию связанных опто-акустических и магнитных флуктуаций и определению критической температуры T_c в высокотемпературных сверхпроводниках. Показано, что спектр таких волн имеет вид

$$\omega_{1,2k}^2 = \frac{1}{2(1-z^4)} \left[\omega_{ak}^2 + \omega_{ok}^2 \pm \sqrt{(\omega_{ok}^2 + \omega_{ak}^2)^2 - 4(1-z^4)\omega_{ak}^2\omega_{ok}^2} \right]$$

где ω_{ok} и ω_{ak} частоты оптических и акустических колебаний.

$z = \frac{\zeta}{\sqrt{(1 + \zeta^2)}}$, параметр ζ является параметром спин-фононной связи

$$\zeta = \frac{U_{ie} B_0 \hbar k_c}{J_0 \sqrt{J_0 s M_{eff}}}, (M_{eff} = \frac{M_m}{M + m})$$

U_{ie} - электрон-ионный потенциал, $k_c = 2\pi/r_c$, r_c - обменный радиус корреляции в системе электронных спинов, M_{eff} - приведенная масса иона кристаллографической элементарной ячейки, $s=1/2$ - спин электрона, M, m - масса иона и электрона соответственно, $B_0 \sim 1$, J_0 - обменный потенциал между спинами электронов.

Показано, что частота продольной спиновой волны (магнитной флуктуации)

$$\omega_{s||k} = J_0 S \sqrt{(k / k_c)^2 - 1}$$

соответствует страйповой фазе.

При этом критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние имеет вид

$$T_c = \frac{2\gamma}{\pi} < \omega_D^2 \omega_s >^{1/3} \exp\left(-\frac{1}{(\lambda - \mu^* + \lambda_s^{trip})}\right)$$

где $\gamma=0,577$ - постоянная Эйлера, ω_D - Дебаевская частота ω_s - спиновая частота, λ - параметр взаимодействия оптических и акустических волн, μ^* - параметр кулоновского отталкивания, λ_s^{trip} - триплетный параметр взаимодействия.

Исследуется возможность повышения критической температуры T_c вплоть до комнатной величины.

Анализируются значения параметров, при которых возможно создание ИК-приемников с высокой обнаружительной способностью на ВТСП без использования системы охлаждения.

Литература

1. Загулин В.В., Савченко А.М., Креопалов Д.В. Сегнетомагнитные ИК - приемники. - 3-е изд., доп. - М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.

Б16 Неохлаждаемые детекторы рентгеновского и гамма излучения на основе кристаллов CdZnTe

Кульчицкий А.Н., Кульчицкий Н.А., Мельников А.А., Мельников О.А.

МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

Монокристаллы твердых растворов халькогенидов кадмия и цинка ($Cd_{1-x}Zn_xTe$) являются сравнительно новым материалом для создания неохлаждаемых детекторов ионизирующих излучений. Твердые растворы $Cd_{1-x}Zn_xTe$ при $x=0,1-0,15$ обладают определенными преимуществами перед наиболее известными широкозонными детекторными материалами. При одинаковой эффективности регистрации гамма-квантов этот материал имеет на порядок более высокое удельное сопротивление, а следовательно более низкие токи утечки, чем кристаллы теллурида кадмия, в то же время обладает в несколько раз более высокой подвижностью носителей заряда, чем кристаллы дионида ртути.

На основе монокристаллов твердых растворов теллуридов кадмия и цинка выращенных из паровой фазы был создан макет неохлаждаемого детектора

ионизирующих излучений и проведено изучение его спектрометрических и дозиметрических характеристик [1].

Исследования характеристик неохлаждаемых полупроводниковых детекторов на основе CdZnTe проводились с использованием стандартных источников α , рентгеновского и гамма излучений: ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{137}Cs . Облучение α -частицами проводилось со стороны отрицательного электрода макета детектора.

Нами был отобран материал, который показал принципиальную возможность создания на его основе эффективных радиационных детекторов. На рис.1 представлен спектр ^{239}Pu , полученный с помощью макетного детектора.

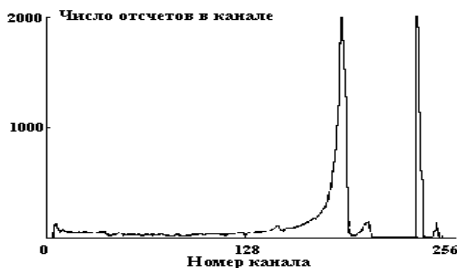


Рис.1. Спектр ^{239}Pu , полученный с помощью детектора на основе CdZnTe толщиной 0,7 мм

На основании анализа формы импульса, вида спектра поглощения с учетом геометрических параметров ($W=0,7$ мм) детектора и условий проведения эксперимента ($V=150$ В) получены следующие характеристики материала и макета детектора:

$$\tau_t = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ с}; \quad \mu_e = 3,70 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}; \quad \chi = 4,88/5,15 = 0,947; \quad \mu_e \tau_e = 4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{В}; \\ \tau_e = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Энергетическое разрешение данного макета детектора составило 80 кэВ (1,5%). На этом образце получены наиболее высокие детекторные характеристики.

На рис.2а приведен спектр γ -излучения источника ^{241}Am , иллюстрирующий спектрометрические свойства детектора на основе CdZnTe толщиной 5 мм.

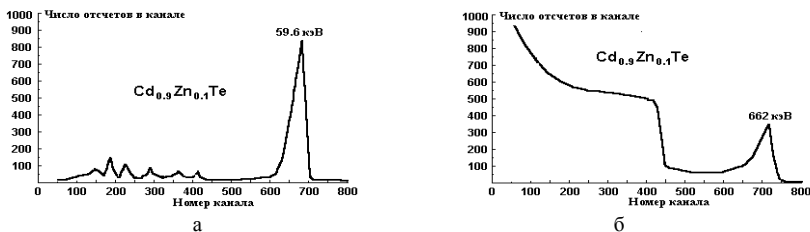


Рис.2. а – Спектр ^{241}Am , полученный с помощью детектора на основе CdZnTe толщиной 5 мм.
б - Спектр ^{137}Cs , полученный с помощью детектора на основе CdZnTe толщиной 10 мм

На рисунке хорошо видны пики 17,8 и 14 кэВ, различим пик с энергией 26,4 кэВ. Из рисунка видно, что спектр захватывает диапазон до 30 кэВ при дискретности 64 эВ на канал. В низкоэнергетической области спектра находится шумовой пик. На линии 59,6 кэВ ^{241}Am получено энергетическое разрешение 6% с чувствительным объемом $0,125 \text{ см}^3$ при напряжении смещения 500 В. На рис.2б приведен спектр γ -излучения

источника ^{137}Cs . На детекторах объемом 1 см^3 разрешение на линии 662 кэВ ^{37}Cs составило 5%.

Проведена оценка дозиметрических характеристик неохлаждаемых детекторов на основе CdZnTe . Для детектора толщиной d (см) и площадью S (см^2), который облучается рентгеновским излучением с эффективной энергией E_x и мощностью экспозиционной дозы P (А/кг) получено выражение для удельной фоточувствительности в амперах на единицу мощности v и на единицу площади:

$$i/PS = I_0 [1 - \exp(-vd)] e (\mu_e \tau_e + \mu_p \tau_p) U_d / \varepsilon d^2,$$

где U_d - напряжение приложенное к детектору, i – ток в детекторе, τ_e и τ_p - время жизни электронов и дырок, μ_e и μ_p подвижности электронов и дырок.

Подставляем численные значения: для эффективной энергии $E_x=30\text{ кэВ}$, интенсивность падающего пучка $I_0=500\text{ эрг}/(\text{см}^2\text{ Р})$, линейный коэффициент поглощения излучения веществом $\nu=32,7\text{ см}^{-1}$, для энергии $E_x=60\text{ кэВ}$, $I_0=3000\text{ эрг}/(\text{см}^2\text{ Р})$, $\nu=8,7\text{ см}^{-1}$. Средняя энергия образования пары $\varepsilon=4,9\text{ эВ}(4,9 \cdot 10^{-12}\text{ эрг})$. Для детекторов, изготовленных из дырочного CdZnTe с экспериментально измеренным произведением дрейфовой подвижности на время жизни $\mu_e \tau_e=10^{-4}$ и $\mu_e \tau_e \gg \mu_p \tau_p$, расчет удельной фоточувствительности при $E_x=30\text{ кэВ}$, толщине $d=0,7\text{ мм}$ и $U_d=150\text{ В}$ дает величину $i/(PS)=749\text{ нА Р}^{-1}\text{ мин см}^{-2}$. При переходе к энергии $E_x=60\text{ кэВ}$ расчет удельной фоточувствительности дает величину $i/(PS)=2284\text{ нА Р}^{-1}\text{ мин см}^{-2}$.

Расчетные значения удельной фоточувствительности находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными.

В целом данные измерений характеристик макетов детекторов показывают принципиальную возможность создания неохлаждаемых детекторов ионизирующих излучений на основе монокристаллов твердых растворов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, выращенных из паровой фазы.

Литература

1. Мельников А.А., Кульчицкий Н.А., Кульчицкий А.Н. Моделирование процессов выращивания кристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ из газовой фазы// Прикладная физика, 2006, №2, с.80-85.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

В17 Блок детектирования рентгеновского излучения на основе кристаллов CdZnTe

Кульчицкий А.Н., Кульчицкий Н.А., Мельников А.А., Мельников О.А.

МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

Кристаллы твердых растворов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ являются наиболее перспективным материалом для создания неохлаждаемых полупроводниковых детекторов рентгеновского и гамма-излучений нового поколения. Данное соединение, при $x=0,1 - 0,15$ обладает определёнными преимуществами перед наиболее известными широкозонными детекторными материалами. При одинаковой эффективности регистрации гамма-квантов этот материал имеет на порядок более высокое сопротивление и, соответственно, более низкие токи утечки, чем кристаллы теллурида

кадия и в то же время обладает в несколько раз более высокой подвижностью носителей заряда, чем кристаллы диоксида ртути.

Для изготовления макетных образцов детекторов использовались монокристаллические блоки кристаллов CdZnTe, удельное электрическое сопротивление которых превышало $10^8 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при 300K [1]. Из такого материала вырезались неориентированные прямоугольные параллелепипеды размерами $5,2 \times 5,2 \times 1,2 \text{ мм}^3$. Все поверхности параллелепипеда механически шлифовались, затем полировались. После этого образцы обезжиривались в толуоле и химически полировались в травителе следующего состава $3\text{г H}_2\text{SO}_4 + 7\text{г K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. После указанных технологических операций окончательные размеры кристалла детектора были $5,0 \times 5,0 \times 1,0 \text{ мм}$. На большие грани прямоугольного параллелепипеда наносился раствор золотохлористоводородной кислоты. Через несколько десятков секунд раствор с поверхности кристалла смывался деионизованной водой и слабым раствором азотной кислоты. Затем кристалл промывался деионизованной водой и сушился. Далее одна из поверхностей кристалла покрывалась индием и припаивалась к медному держателю. К другой золоченой поверхности кристалла также с помощью индия припаивалась медная проволочка.

Для работы с неохлаждаемым полупроводниковым детектором на основе CdZnTe. был разработан оригинальный блок детектирования, схема которого приведена на рис. 1.

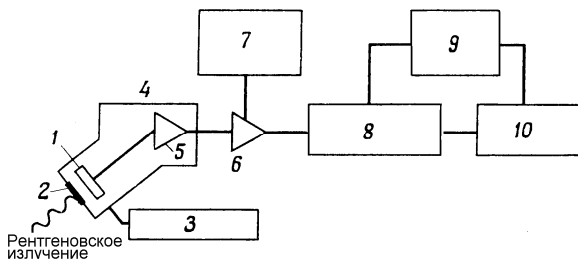


Рис. 1. Схема блока регистрации с неохлаждаемым CdZnTe детектором.

- 1 – CdZnTe - детектор; 2 – бериллиевое окно; 3 – источник смещения; 4 – криостат; 5 – предусилитель на полевом транзисторе; 6 – усилитель; 7- схема подавления наложения импульсов; 8 – многоканальный анализатор; 9 – устройство вывода данных; 10 – ПЭВМ.

Система регистрации работает следующим образом. Рентгеновское излучение от образца проходит через тонкое бериллиевое окно в откачанную камеру, в которой содержится полупроводниковый детектор на основе CdZnTe. Поглощение рентгеновского излучения в области собственной проводимости приводит к образованию пар электрон - дырка, которые под действием приложенного напряжения смещения формируют зарядный импульс. В предусилителе, чувствительном к величине заряда, этот импульс преобразуется в импульс напряжения. Дальнейшее усиление и формирование сигнала происходит в главном усилителе, откуда сигнал поступает в многоканальный анализатор, где происходит разделение импульсов по напряжению (последнее остается пропорциональным энергии падающего излучения). Распределение по энергии регистрируется с помощью двухкоординатного самописца или передается на ЭВМ для дальнейшей обработки.

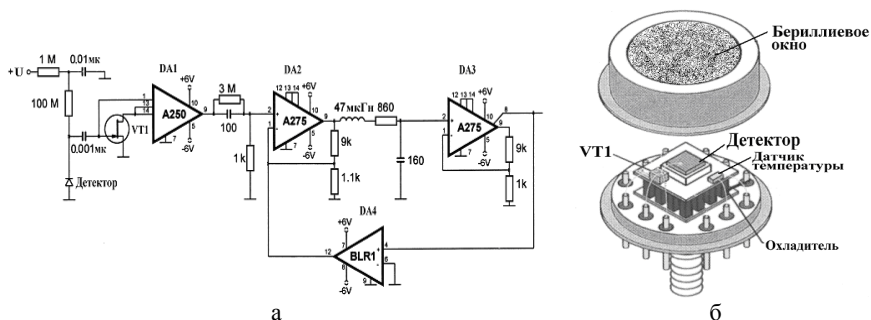


Рис.2.а Принципиальная электрическая схема блока детектирования
 б- CdZnTe - детектор в корпусе

Была разработана оригинальная схема усилителя для работы с CdZnTe – детектором. В качестве первого каскада усиления в предусилителе использован кремниевый полевой транзистор VT1 с *p-n* переходом и каналом *n*-типа, поскольку он обладает значительно лучшим отношением сигнала к шуму, чем другие полупроводниковые приборы (рис. 2а). Энергетический эквивалент шумов предусилителя, составил 0,6 кэВ с использованием в качестве VT1 отобранного транзистора КП 303Г и 0,5 кэВ – транзистора КП 307Ж. Кристалл CdZnTe и первый каскад предусилителя размещены внутри герметичного корпуса ТО8 (рис. 2б).

В состав блока детектирования также входят каскады главного усилителя, собранные из комплектующих фирмы AMPTEK INC. Усилитель А-250 является зарядовым усилителем, А-275 импульсным усилителем. Сигнал, прошедший цепи формирования в главном усилителе с выхода микросхемы DA3, поступает на вход многоканального амплитудного анализатора импульсов (LP-4840, NTA-512В). Для измерения амплитуд использовался аналого-цифровой преобразователь. Входные амплитуды для аналого-цифрового преобразователя соответствовали 0-10 В. Этот интервал может быть разделен на определенное число каналов. Вывод информации осуществлялся на компьютер.

Разработанные неохлаждаемые полупроводниковые детекторы на основе кристаллов CdZnTe найдут применение в области экспериментальной физики, ядерной энергетики, исследования космического пространства, медицины, мониторинга окружающей среды, а также для решения задач создания и совершенствования систем обнаружения ядерного оружия в космосе, систем измерения параметров ядерных взрывов, систем мониторинга ядерных боеголовок и т.д.

Литература

1. Melnikov A.A., Sigov A.S., Vorotilov K.A., Davydov A.A., Topalova L.I., Zhavoronkov N.V. Growth of CdZnTe monocrystals for radiation detectors// J. Crystal Growth. 1999, v. 197, p. 666-669.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

В18 О некоторых возможностях для исследования экситонов в оптической микрополости с квантовыми ямами

¹ Поляков А.Н., ² Franke A., ² Christen J., ¹ Степович М.А.

¹ *Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, Россия*

² *Institute of Experimental Physics, Otto-von-Guericke-University Magdeburg, Germany*

Микрорезонаторы с микрополостями, выполненными из оптически анизотропных материалов, таких как, например, оксид цинка и нитрид галлия, довольно много исследуются в последние годы, так как их возможно использовать для создания оптических приборов опто-, микро- и наноэлектроники, работающих в голубой и ультрафиолетовой областях спектра, в том числе, при высоких напряжениях и в неблагоприятных условиях внешней среды, что делает диагностику физических свойств этих материалов актуальной современной задачей [1-3]. Кроме этого, в силу свойств этих широкозонных материалов в микрополости может реализовываться режим сильного взаимодействия между собственной модой резонатора и экситонами квантовых ям, расположенных в микрополости, ведущий к появлению экситонных поляритонов, что можно наблюдать на спектрах отражения и пропускания (как результат расщепления Раби) [4-6].

Ранее [7] нами уже изучались возможности катодоллюминесцентного метода для количественных исследований транспорта экситонов в квантовых ямах широкозонных полупроводников. В данной работе в продолжение этого направления обсуждаются некоторые возможности проведения математического моделирования и экспериментальных фотоллюминесцентных и катодоллюминесцентных исследований экситонов (а также поляритонов) в квантовых ямах InGaN/GaN, находящихся в оптической микрополости полупроводникового микрорезонатора.

В частности для двух образцов многослойных полупроводниковых структур был проведен расчет дисперсии энергетического коэффициента отражения при помощи метода матриц переноса [8]. При расчетах считалось, что s-поляризованная световая волна падает на образец нормально, то есть угол падения равен нулю. Первая из этих структур полагалась выращенной на подложке из Al₂O₃ толщиной 5·10⁶ нм, затем идет тонкий слой AlN толщиной менее 1 нм, после этого расположен градиентный по x слой Al_xGa_{1-x}N толщиной 100 нм, затем снова очень тонкий слой AlN, после этого слой Al_{0,2}Ga_{0,8}N толщиной 350 нм, затем слой AlN толщиной 15 нм, еще один слой Al_{0,2}Ga_{0,8}N толщиной 350 нм, а затем идет полупроводниковый микрорезонатор. Микрорезонатор состоит из двух брегговских отражателей (DBR, disturbed Bragg reflector) и заключенной между ними AlGaIn микрополости. Нижний брегговский отражатель имеет 40,5 пар слоев Al_{0,85}In_{0,15}N/Al_{0,2}Ga_{0,8}N толщиной 37,28 и 34,75 нм соответственно. Верхний брегговский отражатель состоит из 8 пар слоев Ta₂O₅/SiO₂ толщиной 41,8 и 59,24 нм соответственно. Эти отражатели полностью отвечают условию $\lambda/4$ для света с длиной волны 355 нм. Микрополость имеет толщину 208,49 нм и является так называемой $(3/2)\lambda$ полостью для света той же длины волны.

Второй образец отличается от первого наличием двух серий по пять квантовых ям AlGaIn/GaN в полупроводниковой микрополости. Серии расположены так, что их центры делят микрополость на три равные части, то есть лежат в точках, соответствующим антинодам собственной моды микрополости. Все квантовые ямы полагаются одинаковыми: толщина 3 нм, расстояние между ними 11 нм, резонансная частота экситона 355 нм, радиационное затухание экситона $\hbar\Gamma_0=0,45$ мэВ, нерadiационное затухание экситона $\hbar\Gamma=5,2$ мэВ, что соответствует реальным используемым нами в эксперименте материалам. Спектральные законы дисперсии

коэффициента отражения для различных слоев образцов, которые использовались при расчетах, были взяты нами из [9]. Результаты расчетов представлены на рис. 1.

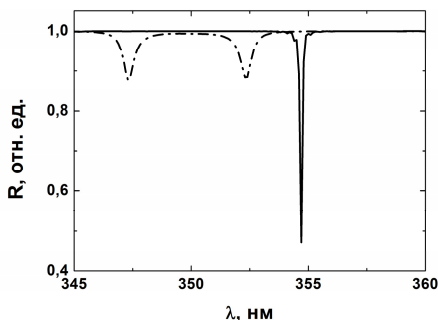


Рис. 1 Спектр отражения полупроводниковых микрорезонаторов без квантовых ям (сплошная линия) и с двумя сериями по пять квантовых ям (прерывистая линия)

Анализ рис. 1 показывает, что при размещении квантовых ям в микрополости в спектре отражения полупроводникового микрорезонатора вместо локализованной моды (сплошная линия) проявляются две особенности (прерывистая линия), что соответствует появлению двух поляритонных веток: верхней и нижней. Таким образом, взаимодействие локализованной моды с экситонным резонансом приводит к появлению дуплетной структуры в спектре отражения, которая характерна для образования экситонных поляритонов.

1. Malpuech G., Kavokin A., Laussy F.P. // Phys. Status Solidi A. 2003. V. 195. p. 568.
2. Zamfirescu M. et al // Phys. Rev. B. 2002. V. 65. p. 1205.
3. Sturm C. et al // New J. Phys. 2009. V. 11. p. 3.
4. Виноградов Е.А. // УФН. 2002 г. Т. 172. №12. С. 1371–1410.
5. Kavokin A. // Appl. Phys. A. 2007. V. 89, Pp. 241–246.
6. Kavokin A., Malpuech G. Cavity Polaritons. Academic Press, 2003. 246 p.
7. Поляков А.Н., Noltemeyer M., Christen J., Hempel T., Степович М.А // Радиационная физика твердого тела: Труды XXI международного совещания / Под ред. Г.Г. Бондаренко. М., 2010 г., в 2-х томах, Т. 1 С. 242-249
8. Born M., Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. 6th ed. Pergamon Press, 1994. 808 p.
9. Handbook of Optics: Optical properties of materials, nonlinear optics, quantum optics, 3rd edition, Vol. 4. McGraw-Hill, 2009. 1152 p.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации и Германской службы академических обменов, а также частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и правительства Калужской области (проект № 12-02-97519-р_центр_а).

В19 Измерение диффузионной длины неравновесных носителей в гетерозитаксиальных структурах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с планарными фотодиодами

Предеин А.В., Васильев В.В.

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

Величина диффузионной длины неравновесных носителей заряда (L_n -для электронов) в фотодиодных ИК детекторах является важным параметром, влияющим на величину квантовой эффективности и темнового тока фотодиодов, а также на фотоэлектрическую связь между фотодиодами. Кроме того, из величины L_n можно определить время жизни электронов τ_n , если известна их подвижность, а затем и концентрацию дырок, определяющую τ_n . Последнее важно для структур, в которых наряду с рабочим слоем р-типа есть подслои n-типа для уменьшения поверхностного сопротивления и измерение концентрации дырок методом Холла невозможно.

В работе предложен метод измерения величины L_n в фотодиодных ИК детекторах на основе гетерозитаксиальных структур кадмий-ртуть-теллура (ГЭС КРТ). Метод основан на изменении величины фототока диода, при его освещении с лицевой стороны через экранирующие индиевые контактные площадки, при изменении величин радиуса p - n перехода r_j диода и радиуса экранирующего контакта R_S . Положительный потенциал подавался на контакт к диоду, а отрицательный к контакту на периферии пластины к рабочему слою р-типа. Постоянный поток теплового излучения поглощается в неэкранированном рабочем слое p -типа n^+ - p диодных тестовых структур, имеющих разные радиусы перехода r_j при постоянном радиусе R_S , либо разные величины R_S при постоянной величине r_j . Собираемый p - n переходом фототок измеряется и его величина зависит от значений L_n , r_j и R_S . Затем вычисляется величина отношения фототоков структур, имеющих разные величины r_j (или разные величины R_S). Для определения L_n нами произведены расчеты зависимости величины отношения фототоков в n^+ - p диодных структурах, описанных выше, от L_n . Было численно решено двумерное уравнение непрерывности для осесимметричной области n^+ - p фотодиода. На верхней и нижней границе рабочего слоя диода скорость рекомбинации неравновесных электронов считалась равной нулю, так как в реальных структурах ГЭС КРТ поверхностной рекомбинации препятствуют варизонные слои. На данный момент описанная методика апробирована на изготовленных диодах Шоттки с размерами контактов к p -области 12×12 , 20×20 , 34×34 мкм² и размером экрана 40×40 мкм². Параметры образца ГЭС КРТ : концентрация $p=5,8 \cdot 10^{15}$ см⁻³, состав $x=0,226$. Значение L_n не измерялось, но исходя из характерных для такого состава и концентрации значений подвижности $\mu_n=(5-8) \cdot 10^4$ см²/(В·с) и времени жизни $\tau_n \approx 10$ нс, можно предполагать что $L_n=18,5 \div 23$ мкм. Измеренное отношение средних фототоков 2-й и 3-й структур к среднему фототоку 1-й структуры было равно: $I_2/I_1=1,54$, $I_3/I_1=2,62$. На первом рисунке приведены результаты расчетов отношения фототоков структур, квадратная форма n -областей и экрана которых была аппроксимирована в расчетах кругами соответствующей площади. Глубина перехода z_j считалась равной 2 мкм. Экспериментально измеренные отношения фототоков соответствуют расчетным при $L_n=20,7$ мкм (нижний график) и $L_n=23,8$ мкм (верхний график).

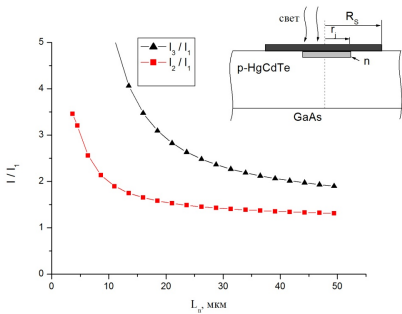


Рис. 1. Отношение фототоков в структурах с $r_j = 8.45, 13, 21$ мкм и $R_S = 22.5$ мкм

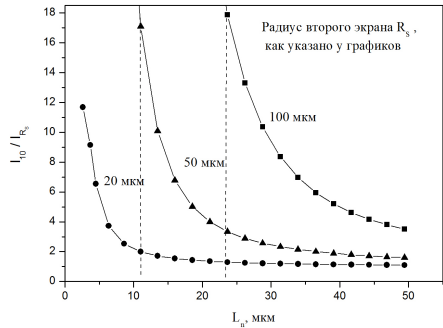


Рис.2. Отношение фототоков в структурах с $R_S = 10, 20, 50, 100$ мкм и $r_j = 6.5$ мкм

Более удобными тестовыми структурами являются структуры с постоянным радиусом перехода r_j , с точки зрения воспроизводимости глубины перехода и получения диффузионной вольт-амперной характеристики (ВАХ). На нижнем рисунке приведены результаты вычисления отношения токов структур $I_{R_S=10}/I_{R_S}$ при $r_j = 6.5$ мкм, $z_j = 2$ мкм и $R_S = 20, 50, 100$ мкм. Видно, что каждому из диапазонов $L_n = 3-11$ мкм, $L_n = 11-24$ мкм и $L_n = 24-50$ мкм соответствует график с наибольшим наклоном кривой, оптимальный для определения величины L_n .

Тестовые структуры предполагается разместить на одной пластине с модулями матриц фотодиодов, тогда предложенный метод позволит совместить определение диффузионной длины неравновесных носителей в рабочем слое матрицы с операцией измерения ВАХ фотодиодов.

Б20 Малогабаритный импульсный источник питания для электронно - оптических преобразователей 2⁺ и 3 поколения

Горбачев А.Б., Чунарев Д.А., Южик И.Б.

ОАО «ЦКБ «Точприбор», Новосибирск, Россия

Целью работы, проводимой ОАО «ЦКБ «Точприбор», является создание малогабаритного импульсного источника питания для серийно- выпускаемых ЭОП с наружным диаметром 43,0 мм. имеющих волоконно - оптические пластины с оборотом или без оборота изображения.

Необходимость создания цифрового импульсного электронно - оптического преобразователя (ЭОП) возникла из современных требований к приборам ночного видения (ПНВ): обеспечение пассивного импульсного и активно-импульсного режимов ЭОП, что обеспечивает работоспособность ПНВ в ночных и в дневных условиях, в диапазоне освещенностей от 10^{-4} до $2 \cdot 10^4$ лк. Для обеспечения возможности работы ПНВ в условиях дымки, тумана, дождя, лазерная подсветка ПНВ синхронизируется с импульсным ЭОП.

Современная схема питания ЭОП учитывает:

- температурные допуски элементов ВИП, потому что сочетание ряда случайных факторов при изготовлении элементов приводит к рассеянию величины их температурных коэффициентов;

- допуск на влажность, уход параметров ВИП под воздействием влаги обусловлен, в основном, изменением от влажности сопротивлений непроволочных резисторов.

Важным параметром цифрового импульсного ЭОП для практического применения является возможность регулировки напряжений, которые поступают на вакуумную часть, с использованием шины данных, что само по себе ведет к повышению эксплуатационной надежности данного класса приборов.

При повышенных и пониженных температурах окружающей среды в цифровом ЭОП легко реализуется возможность компенсации дестабилизирующих факторов.

Ресурс работы ЭОП определяется возможностями современной технологии при производстве вакуумной части и может составлять 10000 часов и более.

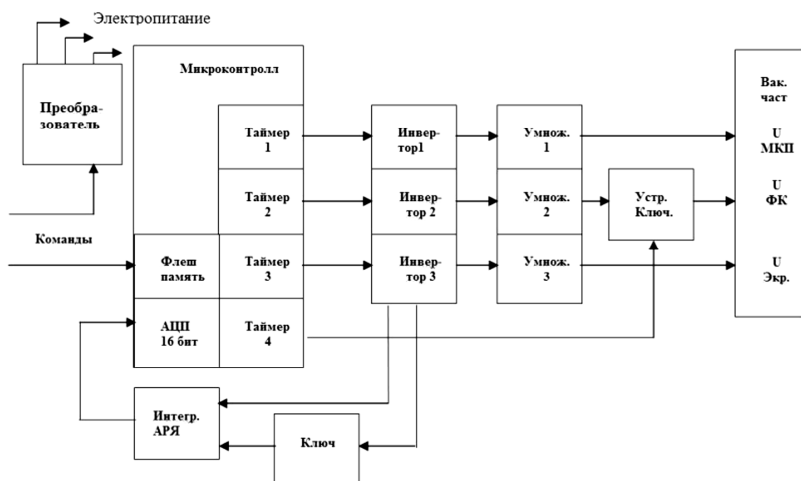
Новая технология производства ЭОПов, развиваемая в ЦКБ «Точприбор» и «ПО «НПЗ» г. Новосибирск, значительно расширяет возможности приборов ночного видения и делает их поистине круглосуточными, теперь они могут использоваться и ночью, и днём, при любых, самых сложных условиях освещённости.

Кроме того, цифровой импульсный ЭОП лучше реагирует на яркие световые засветки, автоматически переключаясь в импульсный режим. Это означает, что ЭОП не работает непрерывно, а включается на короткие промежутки времени, измеряемые в микросекундах, и формирует комфортное для глаза изображение. Программа включения и выключения ЭОПа при различных условиях работы записана в миниатюрном микроконтроллере. При программировании микроконтроллера имеется возможность заложить учёт влияния температуры окружающей среды и других факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики ЭОПа.

При использовании ЭОП с импульсным источником питания «Кайма» увеличивается диапазон рабочей освещенности ПНВ на местности до 20000 лк, что соответствует дневной освещённости без прямого солнечного света. При этом не происходит снижение разрешения ЭОП. Ток потребления ЭОП в импульсном режиме не превышает 50 мА.

По результатам сравнительных исследований ЭОП с цифровым управлением и ЭОП предыдущего поколения было получено значительное повышение динамического диапазона работы ЭОП.

Функциональная схема ЭОП с цифровым управлением



Характеристики ЭОПа "Кайма":

Диаметр фотокаатода 18 мм

Спектральный диапазон 0,5-1,1 мкм

Интегральная чувствительность и предел разрешения – в зависимости от используемых вакуумных блоков

Минимальная наработка 10000 час.

Габариты: диаметр 43 мм, длина 31 мм

Вес 120 г

Габариты нового ЭОПа совпадают с габаритами классических ЭОПов с волоконно-оптическими пластинами (ВОП) с оборотом или без оборота изображения. Поэтому новые ЭОПы могут быть установлены в существующие приборы ночного видения.

Применение новой технологии производства ЭОП поколения 2⁺ и 3 с импульсным источником питания значительно расширяет возможности приборов ночного видения, увеличивает ресурс работы ЭОП и делает их вездесущими. В зарубежных ЭОПах подобная технология называется "auto-gating".

В докладе представлены результаты экспериментов по работоспособности ЭОП в составе ПНВ в дневных условия, без защитной диафрагмы на объективе ПНВ, в также работоспособность ПНВ при засветке фар от автомобиля.

Б21 Тепло-телевизионный прицел для стрелкового оружия

Мордвин Н.Н., Луговский А.Ю., Гугля В.С., Касаткин И.В.

ОАО «ЦКБ «Точприбор», Новосибирск, Россия

Тепло-телевизионный прицел для стрелкового оружия предназначен для наблюдения за обстановкой и ведения прицельной стрельбы из стрелкового оружия. Прицел сочетает в себе преимущества двух различных спектральных диапазонов: видимого и дальнего инфракрасного. Возможность использования для наблюдения двух спектральных диапазонов позволяет значительно повысить эффективность обнаружения целей.

В докладе описаны основные технические решения, принятые в конструкции прицела. Приведены основные тактико-технические характеристики.

Прицел обеспечивает возможность круглосуточной работы в сложных метеорологических условиях и в условиях помех поля боя.

Общая структурная схема прицела приведена на рисунке 1.

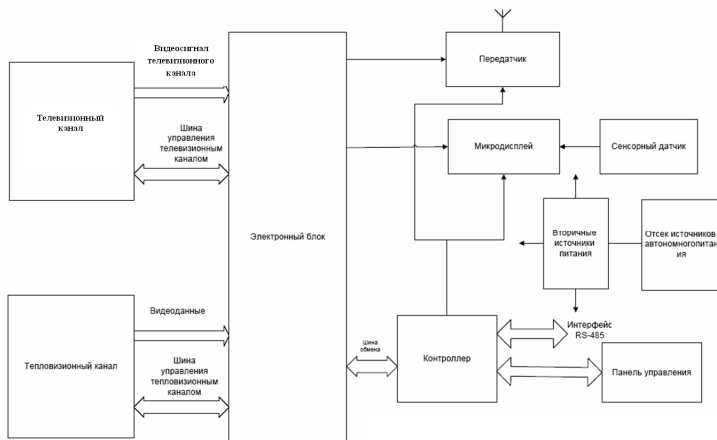


Рисунок 1 – Общая структурная схема прицела

В зависимости от режима работы прицела изображение формируется в видимом диапазоне или тепловом (дальнем ИК диапазоне 8-14 микрон).

В прицеле реализована возможность дистанционной передачи изображения и возможность его интеграции в единое информационное пространство тактического звена.

В состав прицела входят:

- телевизионный канал на основе крупноформатной КМОП матрицы;
- тепловизионный канал на основе неохлаждаемой микроболометрической матрицы;
- высококонтрастный светодиодный микродисплей;
- радиоканал.

Объективы тепловизионного и телевизионного каналов представляют собой отдельные сборочные единицы и имеют подвижку вдоль оптической оси для осуществления фокусировки и компенсации температурного увода фокальной плоскости во время работы. Подвижка объективов осуществляется вращением колец, расположенных на корпусе.

Окуляр прицела состоит из набора линз, закрепленных в оправе. На оправе окуляра закреплен резиновый наглазник со шторкой, обеспечивающий удобство работы оператора с изделием и устраняющий демаскировку световым пятном на лице оператора.

Особенностью конструкции окуляра с наглазником является наличие магнитного кольца в наглазнике и датчика Холла в окуляре, что позволяет реализовать режим энергосбережения. При включенном режиме питания сжатие наглазника вызывает включение микродисплея, а его разжимание – выключение.

В качестве первичного источника питания выбран аккумуляторная батарея габаритов АА с напряжением 1,5 В и емкостью 3 А·ч, который обладает наибольшей энергоемкостью и достаточно распространен в продаже. В состав прицела входят два аккумуляторных отсека, содержащие по две последовательно соединенных аккумуляторных батареи.

Управление прицелом осуществляется четырьмя кнопками, расположенными на боковой стенке.

Тактико-технические характеристики прицела соответствуют лучшим зарубежным аналогам и представлены в таблице 1.

Таблица 1

Наименование параметра	Тепловизионный канал*		Телевизионный канал
	UL 04 27 2	UL 03 19 1	
Дальность распознавания человека, м	750	600	1000
Дальность обнаружения человека, м	2150	1800	-
Поле зрения прицела, град	10,4×7,8	9,1×6,9	4,7×3,8
Масса прицела, кг	1,7		
Диапазон рабочих температур, °С	от минус 30 до +50		
Минимальная дальность фокусировки, м	10		
Удаление выходного зрачка, мм	70		
Диапазон диоптрийной установки окуляра, дптр	от 4 до минус 5		

Примечание: * - в зависимости от использованного фотоприемного устройства.

Общий вид прицела показан на рисунке 2.



Рисунок 2 – Общий вид прицела

Б22 Расчёт быстродействия варизонного фоторезистора с немонотонным координатным профилем ширины запрещенной зоны

Соколовский Б.С., Писаревский В.К., Павлык М.П.

Львовский национальный университет им. Ив. Франко, Львов, Украина

Одной из важных задач, возникающих при разработке фоторезисторов с малыми геометрическими размерами, является устранение или ослабление эффекта вытягивания фотоносителей, проявление которого обуславливает снижение чувствительности фоторезистора при больших приложенных смещениях. В работе [1] была предложена модель варизонного фоторезистора, в котором ширина запрещенной зоны E_g линейно уменьшается от середины образца ($x = 0$) к его омическим контактам $x = \mp d$. В таком фоторезисторе можно значительно уменьшить рекомбинационные потери фотоносителей на контактах и, таким образом, существенно увеличить коэффициент фотоэлектрического усиления.

В данной работе теоретически исследован процесс установление фотопроводимости в фоторезисторе данного типа. С этой целью применительно к варизонному фоторезистору n -типа проводимости на основе твердого раствора CdHgTe переменного состава численно решалось нестационарное уравнение для концентрации фотоносителей Δp :

$$\frac{\tau_p}{L_p^2} \frac{\partial \Delta p}{\partial t} = \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2} - \frac{1}{kT} \left(eE_x \pm \left| \frac{dE_g}{dx} \right| \right) \frac{\partial \Delta p}{\partial x} - \frac{\Delta p}{L_p^2} + \frac{\tau_p G}{L_p^2}, \quad (1)$$

где знаки “+” и “-” относятся соответственно к областям $-d \leq x \leq 0$ и $0 \leq x \leq d$. При записи (1) предполагалось, что диффузионная длина дырок L_p и время их жизни τ_p не зависят от координаты; кроме того, выполняется условие квазиэлектронейтральности ($\Delta n \approx \Delta p$), причем концентрация фотоносителей в условиях однородной генерации со скоростью G значительно превышает концентрацию равновесных дырок.

Уравнение (1) дополнялось граничными условиями

$$\Delta p(\pm d) = 0, \quad (2)$$

которые соответствуют омическим контактам, а также условиями непрерывности концентрации фотоносителей и их потоков в точке $x=0$, где происходит смена знака градиента ширины запрещенной зоны:

$$\Delta p(-0) = \Delta p(+0), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial x} - \frac{1}{kT} \left(eE_x + \left| \frac{dE_g}{dx} \right| \right) \Delta p \Big|_{x=-0} = \frac{\partial \Delta p}{\partial x} - \frac{1}{kT} \left(eE_x - \left| \frac{dE_g}{dx} \right| \right) \Delta p \Big|_{x=+0}. \quad (4)$$

Начальное условие к уравнению (1) соответствовало случаю скачкообразного выключения света в момент времени $t=0$:

$$\Delta p(x, t) \Big|_{t=0} = \Delta p_0(x), \quad (5)$$

где $\Delta p_0(x)$ – стационарное решение уравнения (1) с граничными условиями (2) - (4).

На основании полученных решений производился расчёт временной эволюции полного числа фотоносителей в фоторезисторе, из которой находилось эффективное время релаксации фотопроводимости.

Показано, что из-за действия квазиэлектрического поля, которое оттягивает носители от контактов, время релаксации фотопроводимости в данном фоторезисторе оказывается большим по сравнению со случаем гомозонного фоторезистора с соответствующими параметрами. Согласно результатам численного расчета время релаксации фотопроводимости в рассматриваемом варизонном фоторезисторе уменьшается с ростом приложенного напряжения. На полевой зависимости времени релаксации можно выделить два участка: первый из них характеризуется относительно медленным уменьшением времени релаксации, на втором участке, начинающимся при напряженности внешнего электрического порядка напряженности внутреннего квазиэлектрического поля, наблюдается более крутой спад времени релаксации фотопроводимости.

В работе построены и проанализированы зависимости времени релаксации фотопроводимости варизонного фоторезистора от градиента ширины запрещенной зоны и толщины фоторезистора при различных значениях приложенного смещения.

[1] В.Г. Савицкий, Б.С. Соколовский. ФТП, 1997, Т.31, №1, С.3-5.

Б23 Микроструктура тонких пленок $Ba_{0,7}Sr_{0,3}TiO_3$ для создания приемников ИК-излучения

¹ Турцевич А.С., ¹ Шведов С.В., ¹ Белоус А.И., ¹ Чигирь Г.Г., ² Гременок В.Ф.,
³ Залесский В.Б., ³ Ермаков О.В.

¹ ОАО «ИНТЕГРАЛ», Минск, Беларусь

² Научно-практический центр НАН по материаловедению, Минск, Беларусь

³ ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова НАН», Минск, Беларусь

Сегодня в ряде стран проводятся интенсивные исследования в области материаловедения и технологии для неохлаждаемых приемников ИК-излучения и систем на их основе. Приборы нового поколения на основе пленок пирозлектрических материалов ($Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$, $Pb(ZrTi)O_3$, $SrBi_2Ta_2O_3$ и $Ba_{1-x}Sr_xNbO_3$) могут работать при комнатной температуре со слабой зависимостью чувствительности от длины волны в широкой ИК-области (от 8 до 20 мкм). Основой таких детекторов является тонкопленочный конденсатор, емкость которого резко изменяется под действием ИК-облучения вследствие сильной температурной зависимости диэлектрической проницаемости пленки. Такие детекторы позволяют достигнуть более высокой обнаружительной способности ($5 \cdot 10^8 - 10^9$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹), чем аналогичные приборы на основе резистивных болометров. Методы формирования пленок, пригодные для широкомасштабного применения, должны удовлетворять экономическим, экологическим критериям и обеспечивать высокое структурное качество тонкопленочного материала.

Задачей данной работы было получение тонких пленок $Ba_{0,7}Sr_{0,3}TiO_3$ поликристаллической структуры при пониженной температуре подложки. Использование метода импульсного лазерного напыления пленок обеспечивало возможность сохранения в процессе напыления стехиометрии состава материала.

Пленки BST были изготовлены методом импульсного лазерного испарения керамической мишени $Ba_{0,7}Sr_{0,3}TiO_3$ диаметром 20 мм, используя промышленный неодимовый лазер ГОС-1001 с длиной волны излучения $\lambda = 1064$ нм, длительностью импульса 1,1 мс и энергией в импульсе 150-160 Дж. Выбор состава мишени сделан на основе анализа результатов исследования по формированию BST пленок для создания на их основе оптоэлектронных приборов. Частота повторения лазерных импульсов составляла 0,03 Гц и их количество для напыления пленок толщиной 0,15-0,2 мкм равнялось 40-60. Расстояние между мишенью и подложкой было 65 мм, давление в камере во время напыления составляло $3 \cdot 10^{-2}$ Торр и температура кремниевых подложек была $T_{\text{п}} = 200$ °С и $T_{\text{п}} = 450$ °С.

Структурные свойства и фазовый состав пленок исследовались методом рентгеновского фазового анализа в области $2\theta = 15-100^\circ$ на CuK_α излучении ($\lambda = 1,5405$ Å). Элементный состав определялся методом рентгеновской дисперсионной спектроскопии на аппарате “Stereoscan-360” с EDX-спектрометром “АН 10000” (Link Analytic). Анализ элементного состава по глубине слоя выполнялся на сканирующем Оже-микросонде “PHI-660” (Perkin Elmer). Исследование морфологии поверхности пленок проводилось на атомно-силовом микроскопе (АСМ) NT-206 ф. Microtestmachines Co.

Исследование кристаллической структуры и фазового состава пленок методом рентгеновской дифрактометрии показали, что выращенные слои имеют поликристаллическую структуру, структура решетки кристаллитов - кубическая. При увеличении температуры подложки во время напыления увеличивается интенсивность пика, соответствующего отражению от плоскости (100). Сравнение полученных

рентгенограмм с данными международного центра дифрактограмм (JCPDS) показало, что пики (100) и (110) присутствуют как на рентгенограммах пленок, так и мишени, используемой для получения слоев. Установлено, что распределения атомной концентрации элементов в обеих пленках с толщиной практически не изменяется. Возможность сохранения стехиометрического состава многокомпонентного объемного материала при получении его в виде тонких пленок с помощью импульсного лазерного испарения реализуется благодаря высокой плотности потока энергии лазерного излучения и малой длительности импульса. Это позволяет достичь таких температур, когда все компоненты испаряются в одинаковой мере.

Изображения поверхности, полученные с помощью атомно-силового микроскопа, свидетельствуют о том, что в пленках отсутствуют трещины, разломы и проколы (Рис. 1).

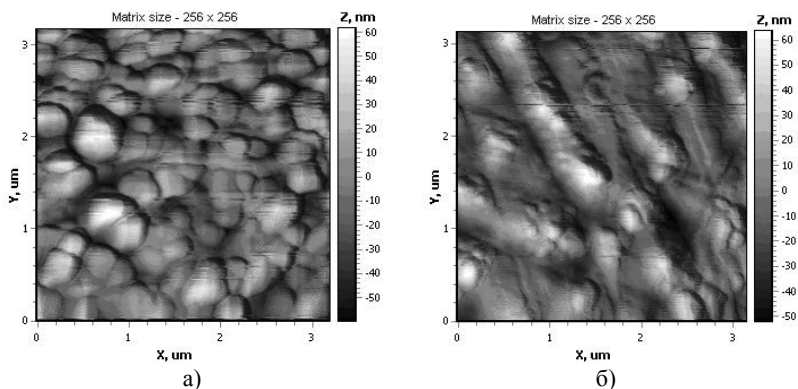


Рис. 1. АСМ изображения топографии поверхности участков $3 \times 3 \text{ мкм}^2$ (а) пленки, нанесенной на подложку при $T_{\text{II}} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, (б) пленки, нанесенной при $T_{\text{II}} = 450 \text{ }^\circ\text{C}$.

Поверхность достаточно гладкая: для пленок, напыленных при $200 \text{ }^\circ\text{C}$, среднеквадратичная шероховатость составляет $21,9 \text{ нм}$, а для слоев, осажденных при $450 \text{ }^\circ\text{C}$ эта величина составляет $9,3 \text{ нм}$. Средний размер кристаллитов при увеличении температуры подложки увеличился с $0,49 \text{ мкм}$ до $0,60 \text{ мкм}$, что оказалось, согласно формуле Шеррера, в соответствии с уменьшением ширины пиков на полувысоте на рентгеновском дифракционном спектре. Изображения поверхности, снятые в различных участках образцов, имели идентичный характер, что свидетельствовало о хорошей воспроизводимости и повторяемости результатов.

Получены тонкие пленки $\text{Ba}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{TiO}_3$ на кремниевых подложках методом импульсного лазерного испарения и исследована их кристаллическая структура, распределение элементного состава по глубине и морфология поверхности. Показано, что метод импульсного лазерного напыления позволяет получить пленки, обладающие поликристаллической структурой, при температуре подложки $200 \text{ }^\circ\text{C}$, в отличие от ранее опубликованных работ, где поликристаллическая структура слоев достигалась при $T_{\text{II}} > 550 \text{ }^\circ\text{C}$. Установлено, что морфология поверхности пленки, размер кристаллитов и среднеквадратичная шероховатость зависят от температуры подложки.

В24 Аппаратура контроля характеристик ИК объективов и систем

Гураль Т.И., Овчар Н.И., Соболев В.П., Тягун В.М.

КП СПС «Арсенал», Киев, Украина

Основными характеристиками, определяющими качество инфракрасных систем, как и для систем, работающих в видимом диапазоне, являются модуляционная передаточная функция (МПФ), и характерные только для ИК диапазона: минимально обнаруживаемая разница температур (MDTD), минимально разрешаемая разница температур (MRTD) и минимальная разница температур, эквивалентная шуму (NETD). При контроле объективов, помимо измерения МПФ, необходимо определять фокусное расстояние, задний фокальный отрезок, поле зрения и ряд других оптических характеристик.

Нами была создана автоматизированная аппаратура для контроля ИК объективов и систем на базе коллиматора с зеркальным объективом, выполненным в виде внеосевой параболы. В отличие от большинства известных средств контроля в качестве приемника излучения при контроле объектива использовался не одноэлементный приемник со сканированием по полю зрения, а тепловизионная камера с болометрической матрицей. В качестве тест-объекта использовалась щель. Несмотря на сравнительно большой размер пикселя матрицы, удалось получить достаточно высокое разрешение, необходимое для достоверного вычисления МПФ, используя специальный алгоритм обработки изображения щели. При этой же конфигурации схемы измерения нами проводились измерения фокусного расстояния, заднего фокального отрезка и поля зрения ИК объективов. При необходимости эта схема позволяет измерять дисторсию и кривизну поля объектива, а также записывать фокусировочные кривые. Одним из достоинств данной схемы является возможность проведения измерений в сагиттальной и меридиональной плоскостях без поворота источника излучения – глобара.

При контроле ИК систем в качестве тест-объекта использовался набор сменных мир, непосредственно за которыми устанавливался плоский ИК излучатель на основе элементов Пельтье с возможностью регулировки его температуры в диапазоне $\pm 30^\circ\text{C}$. Датчики температуры мир и излучателя позволяли контролировать их температуру с дискретностью $0,01^\circ\text{C}$.

Ключевые слова: модуляционная передаточная функция, качество ИК объективов и систем.

В25 Фоточувствительный композит на основе полимер – полупроводник CdIn_2S_4

Зафар Кадыроглы

Институт физики НАН, Баку, Азербайджан

В последнее время значительный интерес вызывают полимерные композиты - материалы, в которых изолирующая полимерная матрица содержит частицы полупроводника. Следует отметить, что полимерная матрица и наполнитель могут активно взаимодействовать. Степень взаимодействия зависит от концентрации и размера наполнителя, типа полимера и условий формирования композиции. Диспергирование полимеров полупроводниковыми частицами приводит к образованию потенциального барьера на границе раздела фаз полимерного матрица – полупроводник

и высота барьера изменяется под действием электрического поля. В настоящей работе исследованы вольт-амперные и спектральные характеристики композита на основе полипропилена (ПП) и наполнителя CdIn_2S_4 .

Нами разработаны технология и способы получения композита в системе полимер-полупроводник CdIn_2S_4 . Получения композита производилось следующим образом. Сначала поликристаллы соединения CdIn_2S_4 измельчались в шаровой мельнице в течение 1 часа. При этом получается порошок, размеры частиц которого не превосходят 2-3 мкм, затем этот порошок смешивается с полимером, растворенном в бензоле. Перемешивание производилось в шаровой мельнице в течение 1 часа. Этот процесс обеспечивал равномерное распределение частиц CdIn_2S_4 в полимере и отчасти дальнейшее измельчение частиц до требуемой степени. Полученная эмульсия наносилась на медную пластинку.

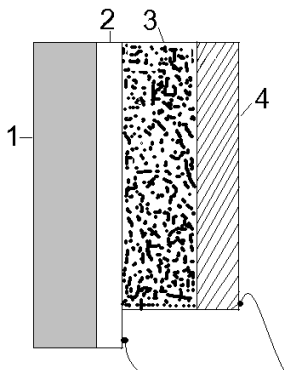


Рис.1.Схематическая диаграмма композита на основе ПП- CdIn_2S_4 : 1-стекло; 2-проводящее покрытие; 3- CdIn_2S_4 в полимерном матрице; 4-медная пластинка

При температурах жидкого азота структура становится чувствительной в области длин волн $450\div 800$ нм, и максимум фототока сдвигается в сторону коротких волн ($540\div 560$ нм) (рис.3, кр.2). Этот максимум в спектре фототока обусловлен межзонным переходом электронов из валентной зоны в зону проводимости.

На рис. 2 показаны темновые и световые вольт-амперные характеристики композита ПП- CdIn_2S_4 . Видно, что вольт-амперные характеристики нелинейны и сопротивления композита с ростом напряженности электрического поля уменьшается.

Изучено также спектральное распределение фототока композита ПП- CdIn_2S_4 при температурах 77 и 300 К (рис.3). Как видно из рисунка при комнатной температуре структура обладает фоточувствительностью в широкой области длин волн $450\div 1200$ нм (рис.3, кр.1), с примесным максимумом в диапазоне $640\div 660$ нм, обусловленный переходом электронов из центров фоточувствительности в зону проводимости в CdIn_2S_4 .

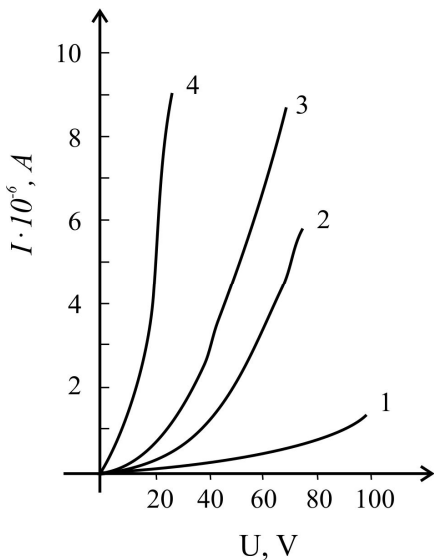


Рис.2. Вольт-амперные характеристики композита ПП- CdIn₂S₄: 1-темновой; 2-4 световые ($L_4 > L_3 > L_2$). L-интенсивность света)

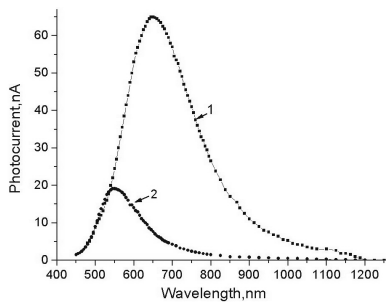


Рис.3. Спектральное распределение фототока композита ПП-CdIn₂S₄ при температурах 300К (кривая 1) и 77К (кривая 2) при U =5 В

1. А.Д.Стадник, Г.К.Кирик. Полимерные композиты и нанокompозиты в магнитных полях, 239 (2005).
2. Z.Kadiroğlu, T.G.Kerimova. Defects in Semiconductors ISDS-25, Book of abstracts, St Peterburg, Russia, 310 (2009).
3. Д.Т.Гусейнов, Т.Г.Керимова, Зафар Кадыроғлы. ФТП, 30,974(1996).

Б26 Особенности распыления в плазме поликристаллических пленок Pb_{1-x}Sn_xTe со столбчатой структурой

¹ Зимин С.П., ^{1,2} Горлачев Е.С., ² Амиров И.И., ¹ Дубов Г.А., ³ Гременок В.Ф.,
³ Иванов В.А., ³ Сейди Х.Г.

¹ Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Россия

² Ярославский филиал Физико-технологического института РАН, Россия

³ Научно-практический центр по материаловедению НАН, Минск, Беларусь

В настоящее время актуальными являются вопросы разработки новых технологических методов микро- и наноструктурирования функциональных материалов оптоэлектроники. Плазменное травление представляет один из базовых процессов формирования приборных структур. Ключевым параметром данной технологической операции является скорость распыления материалов при изменении их состава, что особенно актуально при создании устройств с многослойными структурами на основе твердых растворов. В данной работе представлены результаты измерения скоростей распыления поликристаллических пленок тройного твердого раствора Pb_{1-x}Sn_xTe при травлении в аргоновой плазме и сравнения этих скоростей с данными для монокристаллических образцов.

Слой $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x = 0,16-0,85$) толщиной ~ 1 мкм выращивались на стеклянных подложках методом горячей стенки при температуре подложек 250-340°C и давлении $3 \cdot 10^{-4}$ Па. Исходные мишени, используемые для напыления, были синтезированы путем реакции элементов Pb, Sn и Te (чистотой 99,999%) в кварцевых запаянных ампулах. Пленки являлись поликристаллическими, со столбчатой структурой, с малым размером зерна в поперечнике столбиков в диапазоне от десятков до сотен нм. Шероховатость поверхности составляла 10-40 нм. Характерные электронно-микроскопические изображения морфологии пленок показаны на рис. 1. Плазменная обработка проводилась в аргоновой плотной плазме высокочастотного индукционного разряда низкого давления [1, 2]. Режимы обработки составляли: ВЧ-смещение 300 Вт, средняя энергия ионов $Ag^+ \sim 230$ эВ, расход аргона 5 нсм³/мин, рабочее давление 0,07 Па, длительность обработки 30 с. Скорость распыления материала рассчитывалась из измерений высоты ступеней травления профилометром Talystep.

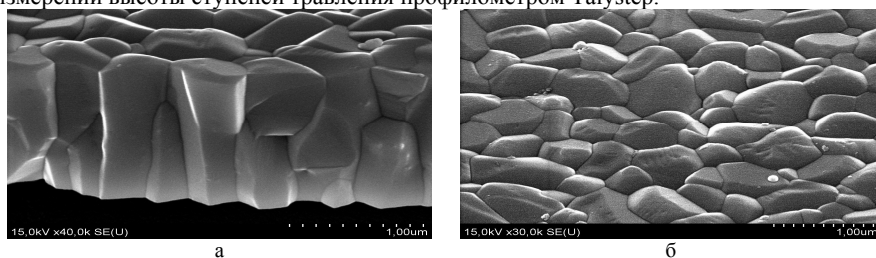


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения поверхности (а) и скола (б) слоя $Pb_{1-x}Sn_xTe$, полученные на установке JEOL 6400

В ходе экспериментальных исследований установлено, что скорости распыления столбчатых поликристаллических пленок теллурида свинца – теллурида олова составляют 2,0-10,7 нм/с. Данные значения значительно уступают скоростям распыления (14,3-15,1 нм/с) монокристаллов и монокристаллических пленок $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ориентации (111) на подложках фторида бария при идентичных режимах плазменного травления. Физическая модель распыления монокристаллических пленок твердых растворов на основе халькогенидов свинца рассмотрена нами в [2]. В докладе приводятся экспериментальные результаты изучения влияния состава, размеров кристаллитов и кристаллографических ориентаций текстурированных пленок на величину скорости распыления. Установлено, что определяющим механизмом, приводящим к уменьшению скорости травления в исследуемых слоях, является эффективное окисление межзеренных границ. Указываются основные рекомендации по учету особенностей операций плазменной обработки поликристаллических образцов, которые необходимо принимать во внимание при формировании приборных структур инфракрасной оптоэлектроники на основе пленочных систем тройных твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe$ с различной величиной x на стеклянных подложках.

1. Zimin S.P., Amirov I.I., Gorlachev E.S. // *Semicond. Sci. Technol.* 2011. V. 26. P. 055018.
2. Zimin S.P., Gorlachev E.S., Amirov I.I., Zogg H., Abramof E., Rappl P.H.O. // *Semicond. Sci. Technol.* 2011. V. 26. P. 105003.

Б27 Влияние направленной деформации на фотоэлектрические свойства кристаллов TlInS_2

Годжаев Э.М., Халилова Х.С., ¹Назаров А.М., ¹Бархалов Б.Ш., ²Байрамов Р.А.

Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

¹Институт физики НАН, Баку, Азербайджан

²Гянджинский государственный университет, Гянджа, Азербайджан

В настоящей работе для повышения фоточувствительности, уменьшения инерционности, расширения линейного участка люкс-амперной характеристики и области спектральной чувствительности фоторезисторов на основе монокристалла TlInS_2 исследовано влияние направленной деформации на его фотоэлектрические свойства.

Образцы для исследования фотоэлектрических свойств изготовлены в виде прямоугольных пластинок с двумя взаимопараллельными гранями естественного скола и размерами $3 \times 2 \times 0,5 \text{ мм}^3$. В качестве измерительных электродов использованы сваренные конденсаторным разрядом никелевые проволоки диаметром 0.1 мм и напыленные вакууме индиевые полоски.

Монокристалл приклеивался на упругую подложку, покрывался прозрачным термостойким лаком М-93 и изгибом подложки подвергался сжатию вдоль оси /001/ в пределах упругой деформации. Амплитудное значение фототока при частоте модуляции белого света $f=10^3 \text{ Гц}$ по отношению к своему максимальному значению увеличивается на 20% при изгибе подложки, соответствующему сжатию $\varepsilon=-2,5 \cdot 10^{-3}$.

В результате проведенных исследований выявлено, что упругое сжатие приводит к более существенным положительным эффектам в изменениях фоточувствительности; по сравнению с недеформированным состоянием, упругое сжатие приемников ($\varepsilon=-2,5 \cdot 10^{-3}$) приводит к повышению их удельной интегральной фоточувствительности. При указанном сжатии ещё больше растёт спектральная чувствительность при определённых длинах волны.

В результате сжатия ($\varepsilon=-2,5 \cdot 10^{-3}$) заметно сужается запрещенная зона активного элемента, что приводит к смещению спектрального распределения фототока в видимой области.

Исследованы люкс-амперной характеристики фоторезисторов из монокристалла TlInS_2 как при отсутствии деформации ($\varepsilon=0$), так и при наличии упругого сжатия ($\varepsilon<0$) вдоль /001/. Обе характеристики снимались при напряжении 100 В, приложенного параллельно оси /001/ при температуре 300 К.

Полученные результаты показали, что в обоих случаях наблюдается два участка люкс-амперной характеристики; при малых интенсивностях света зависимость $J_{\phi} \sim L^{\alpha}$ имеет линейный характер ($\alpha=1$), а при больших - сублинейный ($\alpha=0,5$). Причем, интересный с практической точки зрения линейный участок характеристики, охватывающий область $0 \div 500$ люкс при отсутствии деформации ($\varepsilon=0$) в значительной степени расширяется в сторону больших интенсивностей света, достигая 1130 люкс при упругом сжатии ($\varepsilon=-2 \cdot 10^{-3}$). Из этих данных также следует значительное повышение удельной интегральной фоточувствительности вследствие указанного выше одноосного упругого сжатия активного элемента.

Исследовано спектральное распределения фотопроводимости фоторезистора на основе кристалла TlInS_2 . Выявлено, что максимум фотопроводимости и длина волны, соответствующая половине максимума фотопроводимости заметно смещаются в видимую область спектра в результате одноосного упругого сжатия посредством изгиба подложки. Смещение длины волны, соответствующей половине максимума

фотопроводимости в видимой области (от 0,52 до 0,54 мкм) при этом соответствует сужению запрещенной зоны.

Из сравнения полученных результатов следует спектральное распределение повышения фоточувствительности вследствие одноосного сжатия. Наибольшее относительное повышение фототока, т.е. фоточувствительности с упругим сжатием имело место в длинноволновой области спектральной характеристики.

Следует подчеркнуть, что при статическом сжатии фотоэлектрические параметры активных элементов - кристаллов оказались такими же стабильными, как и у недеформированных кристаллов. При снятии деформации первоначальные характеристики полностью восстанавливаются. После $10^2 \div 10^3$ циклов повторения заметное изменение параметров не обнаружено.

Таким образом, полученные результаты показывают, что монокристаллические фоторезисторы TlInS_2 с изогнутой поверхностью приемного окна являются чувствительными малоинерционными приемниками излучения в видимой области и могут быть успешно применены в микросхемах, спектрометрии, микрофотометрии и других областях для регистрации переменных (модулированных) электромагнитных излучений в ближней ИК-области спектра.

Б28 Исследование процессов формирования фототоковой доменной неустойчивости в высокоомных туннельных МДП структурах

¹ Перепелицын Ю.Н., ² Жаворонков Н.В., ² Антонов В.А.

¹ *Саратовский филиал ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, Россия*

² *ЗАО «НИИ материаловедения», Москва, Зеленоград, Россия*

В настоящее время при создании опико-электронных систем информационного обмена широко используются средства оптоэлектроники. Необходимость эффективного сопряжения электронных и оптических средств в тракте таких систем потребовало создания полупроводниковых СВЧ устройств с гибридным управлением их параметрами. Поэтому в последние годы большую актуальность приобрели работы, направленные на создание оптически управляемых полупроводниковых СВЧ устройств. К числу таких устройств относятся, в частности, и диоды Гана [1].

Влияние освещения на параметры диодов Гана многократно исследовались ранее различными авторами. Эти исследования показали, что оптическое излучение оказывает сложное влияние на их работу. В зависимости от спектральных, пространственно-временных и энергетических характеристик оптического излучения дополнительная подсветка диода может приводить, например, к управлению пороговым полем генерации, управлению спектром и амплитудой генерируемых колебаний, улучшению их когерентности и т.д. Кроме того, в условиях низких температур воздействующее освещение может приводить к генерации низкочастотных колебаний [2]. В [3] было показано, что в диодных структурах, содержащих значительные концентрации примесных уровней (n -GaAs, CdS, ZnS:Mn и др.), при воздействии освещения реализуется рекомбинационная нелинейность, при которой основную роль в образовании низкочастотных колебаний тока играют зависящие от поля обменные процессы, связанные с захватом носителей на примесные уровни и их обратным выбросом в зону проводимости, а перемещение образующихся при освещении доменов происходит за счет перераспределения электронов между зоной проводимости и уровнями захвата.

Исследование фотоэлектрических свойств однородных $M_1TД_1PTД_2M_2$ структур ($M_{1,2}$ - прозрачные для оптического излучения металлические электроды, $TД_{1,2}$ -

нанослой туннельного диэлектрика, П – полупроводник), создаваемых на основе высокоомных электрооптических кристаллов GaAs и n-CdTe с параметрами $n_0L \sim 10^6 \div 10^7 \text{ см}^{-2}$ показало, что постоянное или импульсное освещение таких структур с энергией квантов $h\nu_1 \geq E_g$, где $h\nu_1$ – энергия кванта, E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника, приводит в них на время действия освещения к генерации СВЧ колебаний фототока, причем в отсутствии освещения возникновение генерации в таких структурах экспериментально не наблюдается ни при каких значениях напряжения, прикладываемого к структуре [4].

По результатам экспериментальных исследований с помощью электрооптической методики рассчитаны стационарные профили распределения электрических полей $E(x)$, возникающие в объеме МДП структур GaAs и n-CdTe при освещении до и после образования одиночного фотоэлектрического домена, а также динамика их изменения при включении и выключении освещения. Экспериментальные исследования показали, что при воздействии междузонной оптической накачки мощностью $P_{opt} \sim 20\text{-}25 \text{ мВт}$ на время действия освещения у неосвещаемого электрода туннельной МДП структуры образуется область «сильного поля» ($E(x) \sim 8\text{-}10 \text{ кВ/см}$), величина которого существенно превышает пороговое поле генерации $E_{п}$, причем после образования домена поле вне домена сильно уменьшается, но, тем не менее, остается неоднородно распределенным в объеме МДМ структуры.

Показано, что данный физический механизм лежит в основе не только возникновения генерации фототоковых колебаний в таких структурах, но и обеспечивает в пролетном режиме линейную и обратимую перестройку частоты генерируемых колебаний в диапазоне до 8-10 октав при изменении величины приложенного напряжения или мощности оптической накачки, а также аperiodический, триггерный, ОНОЗ, двух-, трех-, четырехдоменный и другие режимы генерации [4].

Кроме того проведен анализ ВАХ таких структур при освещении. Показано, что ВАХ генерируемых фоточувствительных структур существенно отличаются от ВАХ «классических» диодов Гана и могут быть описаны (в приближении «виртуального фотокатода») выражением [5]: $J_{\phi} = A \cdot \chi \mu^2 / 32\pi L^3$, где J – фототок, протекающий через структуру, A – множитель, зависящий от типа ловушек в полупроводнике, χ – диэлектрическая восприимчивость среды, μ – подвижность основных носителей, V – величина приложенного напряжения, L – расстояние между контактами. Оценена минимальная (пороговая) мощность управляющего оптического импульса, превышение которой обеспечивает возникновение генерации в МДП структуре, а также рассмотрена взаимосвязь мощности оптической накачки с условием Кримера.

Помимо этого, приведены результаты прикладных исследований, связанных с разработкой на основе данного физического механизма оптического СВЧ - модулятора света и оптического коммутатора 1×2 . Устройства такого типа могут быть использованы в современных системах и сетях связи, радиолокации и в различных областях приборостроения для СВЧ-модуляции, коммутации и оптической логической обработки импульсного либо непрерывного оптического сигнала, а также для формирования коротких и сверхкоротких оптических импульсов ближнего и среднего ИК диапазона спектра [6].

Литература

1. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Физика работы полупроводниковых приборов в схемах СВЧ. - Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999. - 376 с.

2. Конуэлл Э. Кинетические свойства полупроводников в сильных электрических полях. /Пер. с англ. под ред. И.Б. Левинсона и Ю.К. Пожелы. - М.: Мир, 1970. - 384 с.

3. Бонч-Бруевич В.Л., Звягин И.П., Миронов А.Г. Доменная неустойчивость в полупроводниках. - М.: Наука, 1972. – 360 с.

4. Перепелицын Ю.Н. Оптический генератор СВЧ импульсов. Патент РФ на полезную модель N 83142 от 20.05.2009 г.

5. Perepelitsyn Yu.N., Khartsiev V.E. Model analysis of conjugated fluxes in semiconductor electro-optical structures. Proc. of the 6 Intern. Confer. on Simulation of Semiconductor Devices and Processes, 1995, N 020, Universitat Erlanger - Nurnberg, D-91058 Erlanger, Germany.

6. Перепелицын Ю.Н. Оптический генератор СВЧ импульсов. Научн. практ. конф. и выставка «Инновации РАН - 2010», г. Казань, 1 - 4 июня 2010 г., С. 115-117.

Б29 Влияние газовой среды при низкотемпературных отжигах на фотоотклик кремния с глубокой примесью

² Гайлес В.М., ² Гаштольд В.Н., ¹ Камаев Г.Н., ¹ Курышев Г.Л., ¹ Ли И.И.,
¹ Чистохин И.Б., ² Хромов В.П.

¹ *Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия*
² *ФГУП НИИП «Восток», Новосибирск, Россия*

Интерес к кремнию, легированному халькогенами (атомами серы, селена или теллура) связан с возможностью использования этих материалов в приборах регистрации инфракрасного излучения. Халькогены в кремнии относятся к кластеризующимся примесям в силу низкой предельной растворимости в замещающем положении и высокой диффузионной подвижности – термообработки при средних температурах приводят к образованию (наряду с изолированными атомами) как димеров, так и более сложных комплексов. В результате в запрещенной зоне кремния образуются глубокие донорные состояния, энергия ионизации которых зависит от размера кластера. Также известно, что комплексы халькогенов, являющиеся двухзарядными донорами, легко пассивируются при взаимодействии с атомарным водородом.

В работе представлены результаты исследований фотоотклика специализированных тестовых структур на основе кремния, легированных селеном в зависимости от влияния условий среды низкотемпературного отжига при 475⁰С 30 минут (в аргоне и водородосодержащей среде). Легирование кремния проводилось с помощью имплантации ионов селена с энергией 125 кэВ в диапазоне доз 100–400 мкКл/см² с двух сторон в пластины кремния КДБ-20 и последующей диффузионной разгонкой примеси при температуре 1200⁰С в течение 72 ч в атмосфере азота.

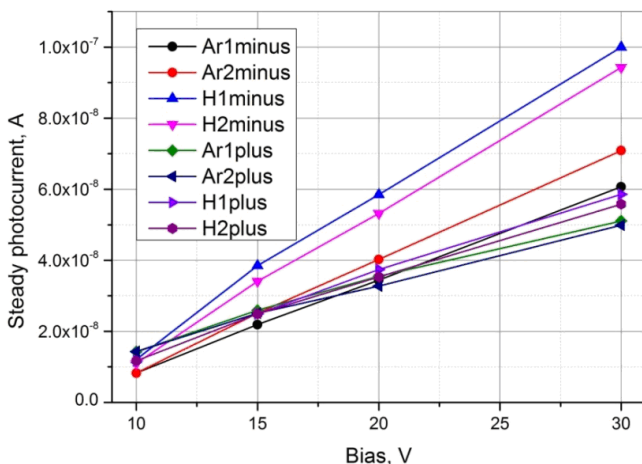


Рис.1. Зависимость фототока от приложенного напряжения на фотосопротивлении кремния, легированного селеном после отжига в среде аргона и водорода (обозначение образцов соответствует среде отжига и полярности приложенного напряжения)

На фотосопротивление при температуре жидкого азота подавалось постоянное регулируемое напряжение различной полярности. Далее измерялся фотоотклик на ступенчатую ИК засветку (длина волны 3 мкм, мощность $6 \cdot 10^{-6}$ Вт/см²), вызывающую оптические переходы электронов с основного состояния примеси в зону проводимости.

На рис. 1 показаны экспериментальные зависимости величины стационарного фототока от приложенного напряжения после отжига в различных газовых средах. Наблюдается суперлинейная зависимость тока после термообработки образцов в водородосодержащей среде. При этом эффект зависит от полярности приложенного напряжения, чего нет после отжига в аргоне. После дополнительного отжига в среде аргона при 530⁰С в течение 4 минут происходит уменьшение наклона фототока от приложенного напряжения (рис.2).

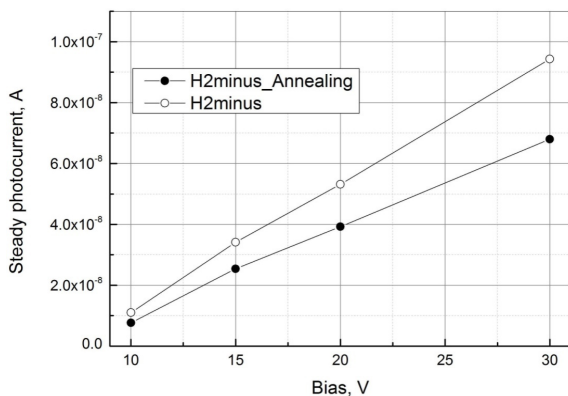


Рис.2 Зависимость фототока от приложенного напряжения на фотосопротивлении кремния, легированного селеном (H2minus) и после дополнительного отжига 530⁰С (H2minus_Annealing)

Полученные результаты интерпретированы с учетом влияния процессов пассивации водородом димеров на перераспределение величины электрического поля по неоднородному профилю распределения легирующей примеси.

Б30 Сравнительный анализ процессов окисления узкощелевых полупроводников $A^{IV}B^{VI}$ и возможностей их практического применения

^{1,2} Берченко Н.Н., ³ Курбанов К.Р., ¹ Фадеев С.В.

¹ Национальный университет «Львовская политехника», Львов, Украина

² Институт физики, Жешувский университет, Жешув, Польша

³ Институт экономики и передовых технологий, Светловодск, Украина

Несмотря на длительную историю их исследования и применения, процессы окисления $A^{IV}B^{VI}$ исследованы недостаточно. В предлагаемой работе для основных бинарных соединений халькогенидов свинца и олова и образуемых ими узкощелевых твердых растворов изучен состав и граница раздела с полупроводником оксидов, полученных различными методами.

Методом равновесных диаграмм фазового равновесия был проведен термодинамический анализ фазового состава границ раздела: оксид - полупроводник. В условиях термодинамического равновесия на начальных этапах окисления теллурида и селенида свинца его продуктами должны быть только тройные оксиды $PbTeO_3$ и $PbSeO_3$ соответственно. Эти предположения хорошо согласуются с результатами исследования методом рентгеновской дифракции состава оксидов, полученных термическим окислением порошков этих материалов в интервале температур $250^0 - 450^0C$. Интересно отметить, что в этом интервале температур, как состав оксида, так и скорость нарастания оксидного слоя (рис. 1), детально изученная нами для $PbTe$ и $PbSe$, хорошо коррелирует с реакционной способностью этих соединений при взаимодействии с молекулярным кислородом, оцененной на основе квантово-химического моделирования [1]. Для бинарных халькогенидов олова в этих же условиях характерно образование диоксида олова и выделение на границе раздела элементарного халькогена. При этом вследствие аморфности SnO_2 , его не удастся обнаружить методом рентгеновской дифракции при температурах окисления менее 450^0C , однако преимущественное окисление олова наблюдалось ранее методом РФЭС при значительно более низких температурах также как и выделение элементарного теллура в $SnTe$ и $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ методом комбинационного рассеяния.

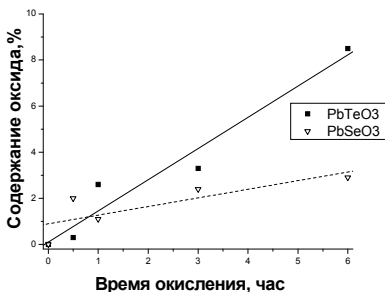


Рис. 1. Кинетика образования окисных кристаллических фаз при нагреве на воздухе при 400^0C бинарных халькогенидов свинца.

По сравнению с термодинамически равновесным окислением электрохимическое и химическое окисления могут значительно изменять состав растущих оксидов, прежде всего за счет селективного растворения. Это особенно касается твердых растворов, для которых электрохимическое окисление приводит к накоплению на границе раздела диоксида олова. В то же время, регулируя состав химического травителя можно добиться почти полного исчезновения на границе раздела полупроводника SnO_2 . Это позволяет использовать химический оксид не только в качестве пассивирующего покрытия фотоприемников на основе PbSnTe , но и, прежде всего, значительно улучшить характеристики фотодиодов на основе барьеров Шоттки, так как тонкий буферный слой химического оксида позволяет исключить нежелательное взаимодействие металла с компонентами полупроводника [2]. В то же время накопление SnO_2 на границе раздела электрохимического оксида с полупроводником позволяет значительно повысить термическую стабильность термоэлементов на основе PbTe с добавкой SnTe в связи со значительно большей термической устойчивостью SnO_2 по сравнению с PbTeO_3 , образующимся при нагреве на воздухе термоэлементов PbTe . Как видно из рис. 2, нагрев структур с анодным оксидом ведет к дальнейшему накоплению на границе раздела диоксида олова.

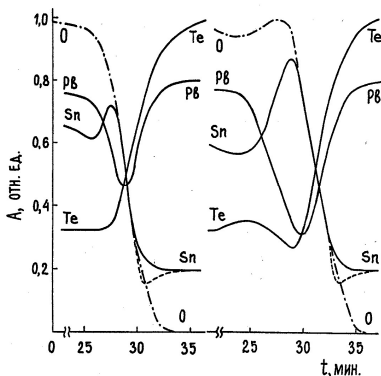


Рис. 2. Зависимость амплитуды оже-пиков элементов от времени травления на границе раздела электрохимический оксид - $\text{Pb}_{0,8}\text{Sn}_{0,2}\text{Te}$, полученной в гальваностатическом режиме; слева - исходная структура; справа - после отжига на воздухе при 350°C в течение 1 часа.

Отжиг структур на основе электрохимического оксида при температурах до 450°C показал, что его защитные свойства не уступают обычно используемым стеклообразным слоям $\text{SiO}_2\text{-PbO-BaO}$ и т.п., технология осаждения которых значительно сложнее электрохимического окисления.

[1] Яшина Л. В. Взаимодействие халькогенидов германия, олова и свинца в твердофазных реакциях и в реакциях «твердое-газ», Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора химических наук, МГУ, Москва - 2008

[2] Гришина Т.А. и др. Журнал технической физики, 1987, т.57, N.12, стр.2355.

Б31 Исследование причин возникновения дефектов при напылении слоя индия

¹ Трошин Б.В., ^{1,2} Климанов Е.А., ¹ Седнев М.В.

¹ ФГУП «НПО «Орион»

² МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

Введение. В изделиях микрофотоэлектроники индий является основным материалом для формирования микроконтактов [1, 2]. В напыленных слоях часто встречаются дефекты полусферической формы - пузыри, капли, области с «аномальной» структурой, зеркальные зерна и черные точки. Данные дефекты, в последствии, вызывают серьезные проблемы при формировании индиевых контактов, так как в местах дефектов, как правило, образуются закоротки величиной в несколько элементов, или, наоборот, происходит потеря нескольких микроконтактов (столбиков).

В настоящей работе представлены результаты исследования причин формирования пузырей в напыляемых слоях индия, а так же изложены методы противодействия их возникновению.

1. Методика эксперимента. Слой индия напылялся на две подложки, представляющие собой кремниевые пластинки, одна из которых была химически очищена, а вторая – химически очищена и на нее был нанесен слой фоторезиста толщиной порядка 2 мкм. Процесс напыления проводился на вакуумной установке с испарителем резистивного типа при величине вакуума в рабочей камере равной $2 \cdot 10^{-4}$ Па. Толщина напыленных слоев составила 8,5 и 8,6 мкм.

2. Результаты. В ходе рассмотрения в микроскоп поверхности двух образцов было установлено, что все наблюдаемые пузыри можно разделить на четыре вида.

Первый вид – пузыри, которые образуются вблизи или непосредственно на микродефектах поверхности кремниевой пластины (мелких и глубоких микровпадинах), закрытых сверху слоем фоторезиста. В случае наличия на поверхности подложки крупного микродефекта закрытого слоем фоторезиста, пузыри образуются в 80 % случаев. Вероятность возникновения пузыря вблизи микродефекта возрастает с увеличением размера микродефекта на поверхности.

Второй вид – пузыри, которые образуются вблизи крупных микродефектов поверхности кремниевой пластины не закрытых сверху слоем фоторезиста. В случае наличия на поверхности подложки крупного микродефекта не закрытого слоем фоторезиста, пузыри образуются в 50 % случаев. Вероятность возникновения пузыря вблизи микродефекта, как и в случае пузырей первого типа, возрастает с увеличением размера микродефекта на поверхности. Пузыри второго типа меньше пузырей первого типа.

Третий вид – пузыри, которые образуются вблизи или непосредственно на микрозагрязнениях, присутствующих на поверхности кремниевой пластины. Данный вид дефектов присутствует как на образце с подслоем фоторезиста, так и на образце без фоторезиста. Размер пузыря зависит от величины и состава микрозагрязнений.

Четвертый вид – пузыри, которые образуются только в слое фоторезиста. Они могут образовываться в любом месте подложки. Их количество увеличивается с увеличением толщины слоя фоторезиста.

3. Обсуждение.

3.1. Рассмотрим наиболее вероятную причину возникновения пузырей первого типа. Наиболее распространенным видом микродефектов на поверхности подложек являются микронеровности поверхности. Так как подложка имеет контакт с внешней средой в виде воздуха, то, в зависимости от размера микровпадины, в нее попадает

некоторое количество паров воды и воздуха. Из паров воды образуется монослой H_2O , который в наибольшей степени скапливается в микровпадинах на подложке. Так же, в них могут сосредотачиваться некоторые микрообъемы воздуха.

При нанесении слоя фоторезиста, монослой воды и микрообъем воздуха, попавший в микровпадину на поверхности подложки, запечатывается наносимым с большой скоростью слоем фоторезиста. Затем, при задубливании фоторезиста, и в процессе напыления индия, из-за увеличения температуры поверхности структуры, данный микрообъем увеличивается в размере и устремляется из микровпадины в слой фоторезиста, а затем - в слой напыляемого индия. В итоге, на поверхности слоя индия возникают пузыри различной величины. Размер пузыря, как правило, зависит от температуры, которую имеет подложка в процессе образования пузыря и величины монослоя H_2O или микрообъема воздуха.

Число молекул воздуха или воды, необходимое для образования пузыря радиуса R , можно оценить, исходя из равенства давления пара внутри и лапласовского давления

$$N = \frac{16\pi\alpha R^2}{3 kT}$$

его оболочки (слоя индия), с помощью выражения: $N = \frac{16\pi\alpha R^2}{3 kT}$, где: α – удельная поверхностная энергия для индия, равная $0,3 \text{ Дж/м}^2$. Отсюда, при $T = 300 \text{ К}$ для $R = 10 \text{ мкм}$ получаем $N = 1,21 \cdot 10^{11}$ молекул, что соответствует объему воздуха при нормальных условиях равного $4,5 \cdot 10^3 \text{ мкм}^2$ или $0,36 \text{ мкм}^3$ воды.

Наиболее простым способом борьбы с пузырями данного типа является использование во время процесса напыления слоя индия охлаждаемого подложкодержателя для снижения температуры подложки, так как он будет способствовать тому, что температура поверхности подложки во время проведения процесса будет оставаться такой, при которой не будет происходить разогрева структуры и увеличения объема запечатанного в микровпадинах воздуха и паров воды.

3.2. Как и в описанном выше случае, до установки в технологическую камеру, подложка имеет непосредственный контакт с воздухом. Из-за этого, в микродефектах поверхности возможно образование монослоя воды, скапливание микрообъемов воздуха и паров масла, в случае использования в системе откачки паромасляного насоса. После помещения подложки в технологическую камеру и начала откачки, молекулы воздуха практически полностью откачиваются высоковакуумным насосом, однако монослой воды остается почти нетронутым. Затем происходит процесс напыления слоя индия на подложку и образование пузырей второго типа, но в меньшем количестве, чем пузырей первого типа.

Это происходит по двум причинам. Во-первых, атомы напыляемого индия являются более тяжелыми по сравнению с молекулами воды и масла, т.е., они могут легко «выбивать» их из микровпадин и разрушать монослой, тем самым не давая скапливаться крупным микрообъемам воды и масла под напыляемым индием, что не дает образовываться пузырям, в особенности, крупным. Во-вторых, в случае, когда на подложку не нанесен слой фоторезиста, поверхность кремниевой пластины начинает нагреваться одновременно с началом процесса напыления. Вместе с разогревом поверхности начинает происходить и процесс обезгаживания, а вследствие этого, вышедшие из микровпадин пары воды и масла могут проходить через еще тонкий слой напыляемого индия и откачиваться высоковакуумным насосом из камеры, не образуя при этом пузырей в напыляемом слое.

Бороться с пузырями второго типа можно так же, как и с пузырями первого типа, т.е. использовать охлаждаемый подложкодержатель для снижения температуры подложки.

3.3. На поверхности подложек могут присутствовать локальные микрозагрязнения различного состава. Этими загрязнениями могут быть остатки

абразивного инструмента, которым производилась резка подложки, остатки полирующего инструмента, посторонние включения в подслое или частицы пыли из воздуха. Каждый из элементов данных микрозагрязнений имеет свою определенную способность к обезгаживанию, то есть испусканию газов при разогреве. С увеличением занимаемого объема частицы возрастает количество испускаемого им воздуха или паров воды. Таким образом, в случае использования плохоочищенной или загрязненной подложки, мы сталкиваемся с ситуацией, аналогичной для возникновения пузырей первого типа.

Для устранения пузырей данного типа необходимо использовать отмытые и очищенные материалы для проведения процесса, а так же применять процесс обезгаживания (прогрев подложек) перед напылением слоя индия в случае использования подложек без подслоя фоторезиста.

3.4. Вероятная причина возникновения пузырей четвертого типа заключается в том, что в процессе сушки структуры «подложка + слой фоторезиста» не происходит полного удаления растворителя из слоя фоторезиста, причем, количество оставшегося в фоторезисте растворителя зависит от толщины слоя. Этому свидетельствует тот факт, что количество пузырей в местах с более толстым слоем фоторезиста больше, чем в местах с тонким фоторезистом.

При использовании методики сушки «hot-plate», сушка фоторезиста происходит в направлении от кремниевой пластины к поверхности структуры. Это объясняется теплопроводностью веществ, так как сначала прогревается и затвердевает ближайший к горячему столику слой фоторезиста, а затем – более далеко распложенные слои. В итоге, такая технология сушки обеспечивает практически полное удаление растворителя через рыхлый слой фоторезиста.

Данный механизм хорошо работает в случае ограниченной толщины слоев фоторезиста. В случае толстого слоя, полное удаление растворителя затруднено. Технология сушки толстого слоя фоторезиста, с использованием технологии «hot-plate», становится похожа на технологию объемной сушки. Отличительной чертой данной технологии является то, что в условиях относительно равномерного распределения температуры по толщине структуры, что происходит при просушивании толстого слоя фоторезиста, последний уплотняется у поверхности. Данное явление, в свою очередь, препятствует выходу растворителя из слоя. Это приводит к тому, что в дальнейшем, во время задубливания и напыления слоя индия, происходит расширение объема растворителя под действием температуры, в результате чего образуются пузыри в фоторезисте и напыляемом слое индия [3].

Таким образом, наиболее простым способом борьбы с пузырями данного типа является применение равномерно-нанесенного слоя фоторезиста небольшой толщины (< 2 мкм), в сочетании с технологией сушки «hot-plate». Так же целесообразно использовать охлаждаемый подложкодержатель для поддержания температуры поверхности подложки на контролируемом уровне.

Закключение. В результате проведенной работы были выявлены типы образующихся в процессе напыления слоя индия дефектов полусферической формы (пузырей) и установлены причины вызывающие их появление. Так же была предложена качественная модель их образования и методы устранения.

Литература

1. А. Г. Клименко, В. Г. Воинов, А. Р. Новоселов, Т. Н. Недосекина, В. В. Васильев, Т. И. Захарьяш, В. Н. Овсяк «Особо пластичные индиевые микростолбы для матричных ФПУ на CdHgTe» // Российская академия наук сибирское отделение авометрия, 1998. - 10 с.

2. Нестеров Д.В. «Получение и соединение индиевых микроконтактов в изделиях микроэлектроники» // Автореферат дисертации на соискание учёной степени к.т.н., М., 2004.

3. Н.И. Батырев, Е.О. Драчева, Е.А. Климанов, А.Р. Микертумянц, Н.Н.Серегина. Исследование процесса формирования индиевых микроконтактов на поверхности кремниевой пластины // Прикладная физика, 2008, №2, с.108-111.

4. Л.С. Палатник, М.Я. Фукс, В.М. Косевич. Механизм образования и субструктура конденсированных пленок, М., «Наука», 1972, стр.319.

Б32 Модификация поверхности напыленных слоев индия в процессах ионного травления

Седнев М.В., Зубкова Е.Н., Шаронов Ю.П.

ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

Перспективным методом изготовления микроконтактов является травление ионами инертного газа [1,2]. Он позволяет воспроизводить с высокой точностью размеры маски фоторезиста, нанесенной на поверхность, что обеспечивает решение проблем возникающих при создании массивов микроконтактов с шагом менее 30 мкм, так как процесс травления идет анизотропно в направлении падения ионов рабочего газа. При этом площадь массивов ограничена лишь размером и однородностью поля ионного потока, а также стандартом фотолитографического оборудования.

Экспериментальные результаты.

В работе были использованы пластины кремния, прошедшие стандартные технологические операции химической очистки поверхности.

Слои индия толщиной $8\div 10$ мкм напылялись испарением при остаточном давлении в вакуумной камере $2\cdot 10^{-4}$ Па со скоростью осаждения 1 мкм/мин. В этих режимах поверхность индия зеркальна, шероховатость не превышает 40 нм. Однако в темном поле микроскопа на поверхности наблюдаются светящиеся точки размером около 1 мкм, расположенные с плотностью $(1\div 2)\cdot 10^4$ см⁻². Пленки индия имеют поликристаллическую структуру с размером зерен $5\div 20$ мкм. Травление поверхности индия ионами аргона выполняли на установке ионно-лучевого травления с источником Кауфмана. Давление остаточной среды не более 10^{-4} Па.

Для формирования конфигурации элементов (контактов) при травления слоя индия в качестве защитной маски использовали фоторезист,

Распыление слоя индия выполняли ионами аргона энергией ~ 1 кэВ и плотностью потока 0.2 мА/см².

На Рис.1а, б, в представлены фотографии поверхности разных участков пластины после распыления ионами аргона.

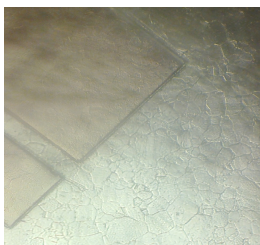


Рис. 1а. Фото поверхности индия после травления индия 4 мкм. Ширина промежутка в маске 25 мкм

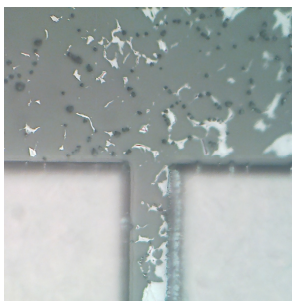


Рис. 1б. Фото поверхности пластины с остатками слоя индия. Ширина промежутка в маске 25 мкм

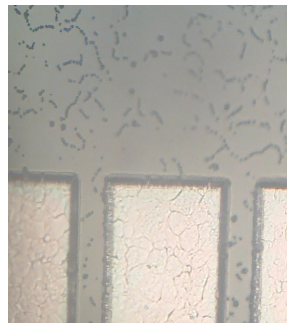


Рис. 1в. Фото поверхности после травления индия (8 мкм). Ширина промежутка в маске 25 мкм

На фотографиях видно образование и развитие рельефа на исходной поверхности напыленного индия после ионно-лучевого травления. Показано, что причинами, обуславливающими это являются:

-микроструктурная структура напыленного слоя индия, с присущими ей границами зерен;

-пересадка материалов участвующих в процессе ионно-лучевого травления (подложкодержатель, элементы крепления, обрабатываемого образца). Эти образования обладают значительно меньшей скоростью распыления [3];

-механические загрязнения. Они появляются в процессе подготовки пластины к напылению, фотолитографической обработки пластины перед ионным травлением или межоперационной транспортировки пластины и ведут себя в процессе ионного травления подобно маске фоторезиста, закрывая участки индия.

-профиль и размеры маски.

Литература.

1. И.Д. Бурлаков, К.О. Болтарь, М.В. Седнев. Ионно-плазменные процессы в технологии изготовления МФЧЭ из КРТ

2.М.В. Седнев, К.О. Болтарь., М.Д. Корнеева, Ю.С. Мезин. «Формирование индиевых микроконтактов ионным травлением.» Прикладная физика №1, 2011.

3. Седнев М.В., Болтарь К.О., Мезин Ю.С., «Исследование факторов, определяющих анизотропность ионно-лучевого травления напыленного слоя индия». Прикладная физика, в печати.

Б33 Влияние природы растворителя на устойчивость высокодисперсных и наноразмерных систем теллурида кадмия

Капуш О.А., Трищук Л.И., Томашик В.Н., Томашик З.Ф., ¹Борук С.Д.

Институт физики полупроводников НАН, Киев, Украина

¹ Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича, Украина

В последнее время значительный интерес исследователей вызывают полупроводниковые соединения типа $A^{IV}B^{VI}$, которые являются перспективным материалом для создания приборов микроэлектроники нового типа за счет проявления

квантово-размерных эффектов. Наиболее ярко эти эффекты выражены для CdTe в связи с большим Боровским радиусом экситона ($a_B = 7,5$ нм по сравнению с $a_B = 5,4$ нм для CdSe). Однако среди наноразмерных халькогенидов кадмия CdTe исследован менее всего. Это связано со сложностью получения его коллоидных растворов, что обусловлено склонностью многих соединений Te(II) к распаду и их высокой степенью токсичности. При этом соразмерность наночастиц и молекул дисперсионной среды предопределяет специфику кинетики химических реакций на их поверхности. Высокая плотность высокодисперсных и наноразмерных частиц полупроводниковых соединений, таких как CdTe, приводит к их агрегации и, как следствие, к потере седиментационной устойчивости растворов. Современные методики получения нанокристаллов (НК) CdTe должны характеризоваться возможностью получения большого количества образцов с достаточным контролем их размеров, формы и дисперсности, чтобы свойства единичных НК не усреднялись неоднородностью образца. Наиболее распространенным методом регулирования устойчивостью таких систем является проведение адсорбционной модификации поверхности НК. Адсорбция модификаторов, как правило, приводит к уменьшению поверхностной энергии, что способствует разрушению агрегатов в дисперсных системах и предотвращает возникновение коагуляционных контактов между частицами при их оседании. К наиболее распространенным модификаторам относятся поливиниловый спирт, полифосфат натрия, желатин, тиогликолевую кислоту, тиоглицерол, цистеин.

Целью данной работы является исследование влияния природы растворителя на свойства микро- и нанокристаллов CdTe в ходе их синтеза и постсинтетической обработки.

Для исследований использовали высокодисперсный теллурид кадмия, полученный путем измельчения монокристаллических блоков, выращенных методом Бриджмена. В качестве стабилизатора поверхности частиц использовали тиогликолевую кислоту (ТГК), а в качестве дисперсионной среды – деионизированную воду, метанол, этанол, пропанол, изопропанол, бутанол, изобутанол, пентанол, изопентанол, гептанол, нонанол.

Исследования показали, что изотермы адсорбции ТГК на поверхности микрокристаллов (МК) CdTe из различных сред имеют разный характер. Во всех случаях они выходят из начала координат, однако при адсорбции ТГК на поверхности теллурида кадмия из воды, метанола, этанола, а также более высокомолекулярных пентанола, изопентанола, гептанола и нонанола изотермы имеют S-подобную форму. Изотермы адсорбции с пропилового, изопропилового, бутилового и изобутилового спиртов имеют классическую Ленгмюровскую форму. Это говорит о том, что формирование адсорбционного слоя ТГК на поверхности теллурида кадмия из данных растворителей происходит только за счет адсорбции индивидуальных молекул ТГК. Предельные значения адсорбции из пропилового, изопропилового, бутилового и изобутилового спиртов меньше, нежели в случае проведения адсорбции из воды, метанола, этанола, пентанола, изопентанола, гептанола и нонанола. Во всех случаях закрепление молекул ТГК на поверхности МК CdTe происходит за счет сил Ван-дер-Ваальса, то есть имеет место физическая адсорбция. Адсорбция носит обратный характер, что подтверждается опытами по десорбции ТГК с поверхности теллурида кадмия чистым растворителем.

Следует также заметить, что значения предельной адсорбции зависят от энергии адгезионного взаимодействия в системе *растворитель – адсорбент (CdTe)*. Как видно из приведенных данных адсорбционная способность ТГК на поверхности теллурида кадмия уменьшается в ряду растворителей:

$$A_{(\text{метанол})} > A_{(\text{этанол})} > A_{(\text{пентанол})} > A_{(\text{изопентанол})} > A_{(\text{пропанол})} > A_{(\text{изопропанол})} > \\ A_{(\text{гептанол})} > A_{(\text{нонанол})} > A_{(\text{вода})} > A_{(\text{бутанол})} > A_{(\text{изобутанол})}$$

Такая тенденция к изменению адсорбционной способности, вероятно, связана с процессами междумолекулярных взаимодействий в растворах. Максимальные значения адсорбции ТГК на поверхности МК CdTe в данном случае достигаются при проведения процесса из метилового и этилового спиртов.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что стабилизацию частиц CdTe в высокодисперсионных и наноразмерных системах лучше всего проводить при использовании метанола и этанола в качестве растворителя. Эти результаты могут быть использованы при разработке и оптимизации методик получения НК CdTe путем коллоидного синтеза.

Метод коллоидного синтеза разрешает получить НК CdTe из средним гидродинамическим радиусом от 1 до 1000 нм и ярко выраженными фотолуминесцентными (ФЛ) свойствами. Согласно результатам исследований, приведенным выше, в качестве дисперсионной среды лучше всего использовать метанол и этанол. Однако осуществить синтез НК CdTe в метиловом или других одноатомных спиртах за приведенной в данной работе методикой не получается. Вследствие нерастворимости H_2Te во всех одноатомных спиртах вышеприведенного ряда он проходит сквозь реакционную среду, не вступая в химическую реакцию с ионами кадмия. Практически в полном объеме H_2Te попадает в выхлопные газы установки, где нейтрализуется 0,1 М раствором гидроксида натрия, образуя черный осадок мелкодисперсного Te. Поэтому в качестве дисперсионной среды при синтезе НК CdTe использовали деионизированную воду с дальнейшим переводом частиц в этиловый спирт.

Коллоидный синтез осуществляли путем осаждения ионов кадмия ионами теллура в атмосфере аргона в трехгорлом реакторе, оснащенном электромагнитной мешалкой, термометром, перегородками и клапанами. В качестве источника теллурид-ионов использовали H_2Te , полученный электрохимически в гальваностатической ячейке. Для стабилизации поверхности частиц использовали ТГК, а в качестве дисперсионной среды – деионизированную воду.

Исследования показали, что в полученных растворах кроме НК CdTe также остается избыток стабилизатора, ионы Г и, зависимо от соотношения исходных веществ, ионы Na^+ , Cd^{2+} , а также мелкодисперсный кристаллический теллур. Исходя из того, что полученные за данной методикой НК CdTe характеризуются наличием на их поверхности негативного заряда, присутствующие в системе заряженные ионы могут взаимодействовать с поверхностью НК. В результате этого может наблюдаться резкое уменьшение интенсивности и квантового выхода ФЛ. Для уменьшения влияния природы и количества прекурсоров на оптические свойства полученных коллоидных растворов мы разработали методику извлечения НК CdTe из исходных растворов. Анализ спектров ФЛ полученных растворов показал, что данная постсинтетическая обработка позитивно влияет на их оптические свойства.

Поскольку коллоидные НК CdTe диспергированы в растворе и не связаны с твердой поверхностью, они могут быть изготовлены в больших количествах в реакционной камере с дальнейшей инкорпорацией в полимерную матрицу. Это позволяет использовать данные системы для изготовления рабочих элементов различных приборов микроэлектроники.

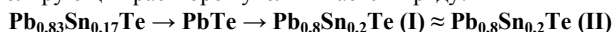
Б34 Формирование полированных поверхностей монокристаллов PbTe и Pb_{1-x}Sn_xTe

Томашик В.Н., Маланич Г.П., Томашик З.Ф., Стратийчук И.Б., Пащенко Г.А.

Институт физики полупроводников НАН, Киев, Украина

Предложен способ формирования полированных поверхностей монокристаллов PbTe и Pb_{1-x}Sn_xTe высокого качества, включающий струнную резку слитков на пластины, механическое шлифование пластин, химико-механическое (ХМП) и химико-динамическое полирование (ХДП) разработанными нами бромвыделяющими травителями. Исследовали выращенные методом Бриджмена монокристаллы PbTe и твердых растворов Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te, Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te (II), а также полученные из паровой фазы Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te (I).

Механическое шлифование пластин проводили водными суспензиями абразивных порошков М10-М1. Нарушенный при резке и шлифовании слой толщиной 100-150 мкм удаляли методом ХМП травителем (об.%): 6 H₂O₂ – 74 HBr – 20 этиленгликоль (ЭГ) со скоростью полирования ≈80 мкм/мин. Травители готовили из 48 %-ной HBr, 35 %-ного H₂O₂ и ЭГ (состав выражали в об.%). Процесс ХДП проводили на установке с использованием методики вращающегося диска, при T = 294-300 K и скорости вращения диска γ = 86 хв⁻¹. Установлено, что травители, содержащие (об.%): (2-10) H₂O₂ : (48-98) HBr : (0-50) ЭГ формируют блестящую поверхность исследуемых материалов (скорости полирования составляют 1,5-17 мкм/мин), причем размер областей полирующих растворов увеличивается в ряду:



Микроструктуру поверхности образцов после различных этапов механической и химической обработки исследовали на металлографическом микроскопе МИМ-7 с цифровой видеокамерой eTREK DCM800 (8 Mpix) и настольном сканирующем (растровом) электронном микроскопе JEOL JCM-5000 NeoScore. Шероховатость полированной поверхности определяли с помощью профилометра ALPHA STEP 100 фирмы TENCOR INSTRUMENT, определяющим высоту микронеровностей ≥5 нм.

Предложенные составы полирующих травителей H₂O₂–HBr–ЭГ и методики обработки поверхности монокристаллов PbTe и Pb_{1-x}Sn_xTe способствуют значительному уменьшению шероховатости поверхности (таблица) по сравнению с ее величиной, полученной после резки слитков на пластины, шлифования и ХМП.

Параметры шероховатости поверхности после различных этапов обработки

Этапы обработки	Образец	R _z , мкм	R _{ar} , мкм	R _{max} , мкм	Состояние поверхности
струнная резка	PbTe	1,54	0,5	2,0	структурные нарушения и следы реза
	Pb _{0,8} Sn _{0,2} Te (I)	1,32	0,55	1,8	
струнная резка + шлифование свободным абразивом	PbTe	0,90	0,25	1,2	структурные дефекты
	Pb _{0,8} Sn _{0,2} Te (I)	0,80	0,28	1,25	
струнная резка + шлифование свободным абразивом + ХМП	PbTe	0,25	0,07	0,27	ровная, зеркально-гладкая
	Pb _{0,8} Sn _{0,2} Te (I)	0,18	0,05	0,22	
струнная резка +	PbTe	0,29	0,11	0,45	ровная,

Этапы обработки	Образец	R_z , мкм	R_a , мкм	R_{max} , мкм	Состояние поверхности
шлифование свободным абразивом + ХМП + ХДП	$Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (I)	0,26	0,09	0,32	зеркально-гладкая

На рис. 1 приведена микроструктура поверхности монокристаллов PbTe после различных этапов обработки: после струнной резки, после ХМП, а также после ХДП полирующим травителем H_2O_2 –HBr–ЭГ (микрофотографии сделаны с помощью электронного микроскопа).

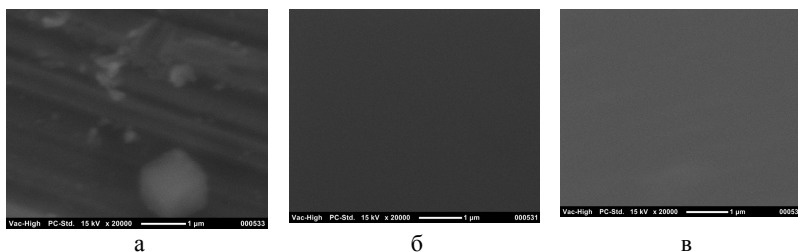
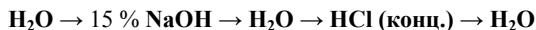


Рис. 1. Микроструктура поверхности монокристаллов PbTe: (а) – после струнной резки; (б) – после ХМП полирующим раствором (в об. %): 6 H_2O_2 : 74 HBr : 20 ЭГ; (в) – после ХДП травителем (в об. %): 4 H_2O_2 : 58,5 HBr : 37,5 ЭГ

Промывка образцов после ХДП и ХМП является очень важным этапом, а промывание их только деионизированной водой неэффективно. По разработанной нами методике после завершения процесса травления образцы необходимо быстро извлечь из травителя и сразу же промыть по схеме (по 30 сек в каждом растворе):



Разработанные бромвыделяющие травильные композиции имеют ряд преимуществ в сравнении с традиционными бромсодержащими травителями, поскольку их применение позволяет:

- ✓ избежать необходимости использования токсичного свободного Br_2 ;
- ✓ упростить процесс приготовления травильных композиций;
- ✓ уменьшить скорости растворения полупроводников путем регулирования ее введением третьего вязкого компонента (ЭГ);
- ✓ дает возможность удалять тонкие слои с поверхности монокристаллов;
- ✓ дает возможность получать высокое качество поверхности полированных кристаллов PbTe и твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe$.

Б35 Алгоритмическое и программное обеспечение экспресс-оценки и повышения качества многоэлементных фотоприемных устройств на основе быстрого вейвлет-преобразования

Бехтин Ю.С., Баранцев А.А.

Рязанский государственный радиотехнический университет, Россия

Рассматриваемые в докладе алгоритмы и программное обеспечение (ПО) были получены после завершения совместной работы с НПО «Орион», связанной с созданием аппаратно-программного комплекса, состоящего из болометра, платы аналогово-цифрового ввода-вывода АМВРСИ и персонального компьютера (ПК) [1]. Вначале разработанное ПО позволяло перед формированием ИК-изображения на мониторе ПК проводить двухточечную предварительную калибровку (по низкой и высокой температурам). Затем были разработаны и добавлены в ПО комплекса алгоритмы автоматической (периодической) двухточечной калибровки, поскольку коэффициенты передачи фотоэлементов (геометрический шум чувствительности) могут значительно изменяться (дрейфовать) в рабочем режиме. Длительные прерывания рабочего режима на калибровку – всегда нежелательное действие, поэтому была поставлена задача разработки методов и алгоритмов межкадровой калибровки ФПУ по небольшому числу кадров, которые занимают относительно малое время. Особенностью поставленной задачи является тот факт, что в ряде случаев не удается создать однородное калибровочное поле засветки объектива ФПУ, что приводит к неработоспособности известных алгоритмов оценки геометрического шума с временным накоплением.

Основная причина плохой работы известных алгоритмов лежит в недостатке информации, содержащейся в одном кадре. Дополнительную информацию можно получить, если использовать обработку нескольких соседних кадров, которые условно содержат одну и ту же сцену, но отличаются интенсивностью геометрических шумов. В данном контексте поставленная задача сводится к задаче комплексирования зашумленных изображений.

В результате исследования получен метод и соответствующие алгоритмы для комплексирования зашумленных изображений с использованием быстрого вейвлет-преобразования. Особенностью метода является применение т.н. пространственно-ориентированных деревьев (ПОД) вейвлет-преобразования, которые получают путем зигзагообразного сканирования вейвлет-коэффициентов соответствующих кусочно-регулярных структур субполос вейвлет-декомпозированного изображения. Если применение ПОД в целях сжатия предусматривает пороговую обработку вейвлет-коэффициентов (обнуление части вейвлет-коэффициентов), то в предлагаемом методе пороговая обработка полностью исключена, что приводит к отсутствию блочных артефактов на комплексированном изображении. Проведенные исследования также показали, что относительно точная (до 4%) оценка таких показателей, как величина темнового тока, коэффициенты передачи фоточувствительных элементов (геометрический шум чувствительности), количество дефектов, уже возможна при числе кадров, равным 3. Данное обстоятельство делает возможным разработку ПО, работающего в реальном масштабе времени, не прерывая рабочий режим ФПУ на периодическую калибровку.

В докладе также приводятся результаты машинных экспериментов при разных моделях дрейфа коэффициентов передачи фотоэлементов, зависимости точности оценивания коэффициентов передачи от скорости и направления их дрейфа, уровня тепловых шумов и темновых токов элементов матрицы и т.п.

1. Бехтин Ю.С., Баранцев А.А., Соляков В.Н., Медведев А.С. Аппаратно-программный комплекс цифровой обработки сигналов многорядных матричных фотоприемных устройств. Прикладная физика, № 3, 2007. С.77-82.

Б36 О координатно-чувствительных фотодиодах с поперечным фотоэффектом (бифотозлементы, квадратные)

Лисейкин В.П.

ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

Пятьдесят лет назад в России в НПО «Орион» был изобретен координатно-чувствительный фотодиод с поперечным фотоэффектом, который успешно выдержал испытание временем [1].

Формула изобретения – «координатно-чувствительный фотодиод с поперечным фотоэффектом, отличающийся тем, что с целью увеличения крутизны координатной характеристики и размера линейной зоны, он выполнен с разделенной базой, каждая полученная часть имеет омический контакт». Изобретение относится к координатно-чувствительным фотодиодам, как на широкозонных полупроводниках, так и на узкозонных при различных способах разделения базы.

По количеству разработок, объему выпуска и областям применения он потеснил позиционно-чувствительные фотодиоды с продольным фотоэффектом, бикристаллические и другие.

На рисунке 1 приведена структура координатно-чувствительного фотодиода с поперечным фотоэффектом и для сравнения с продольным фотоэффектом.

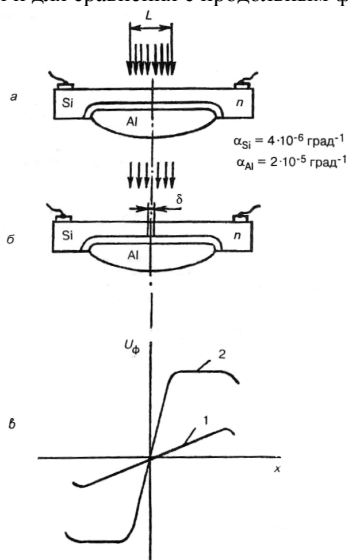


Рис. 1. Координатно-чувствительные фотодиоды: а - структура координатно-чувствительного фотодиода с продольным фотоэффектом; б - структура координатно-чувствительного фотодиода с поперечным фотоэффектом; δ - расстояние между элементами; α - коэффициент линейного расширения Al и Si; в - координатные характеристики фотодиодов:

1 - с продольным фотоэффектом; 2 - с поперечным фотоэффектом; L - размер светового пятна.

Принцип действия координатно-чувствительного фотодиода с поперечным фотоэффектом заключается в следующем: при перемещении светового пятна, размер которого менее или в предельном случае равен расстоянию между контактами, изменяется величина светового потока на каждом фотодиоде, соответственно этому изменяется и фото-ЭДС на них. Сравнивая фото-ЭДС можно судить о координате светового пятна. Основные свойства, характеристика и параметры координатно-чувствительного фотодиода с поперечным фотоэффектом приведены в работах [2-20]. Крутизна у фотодиода с поперечным фотоэффектом на несколько порядков выше, чем у фотодиода с продольным фотоэффектом. В работах [7,8] показано, что для получения малого остаточного напряжения в нулевой точке, малой взаимосвязи между элементами и малого дрейфа нуля от температуры необходимо использовать фотодиодный режим включения в электронной схеме.

Изобретение координатно-чувствительного фотодиода с поперечным фотоэффектом привело к активизации работ, как в направлении разработок двухкоординатных фотодиодов различных типов, так и оптико-электронных систем на их основе.

На рисунке 2 приведены различные топологические конфигурации координатно-чувствительных фотодиодов с поперечным фотоэффектом, каждая из которых отвечает необходимым требованиям соответствующих оптико-электронных систем [20].

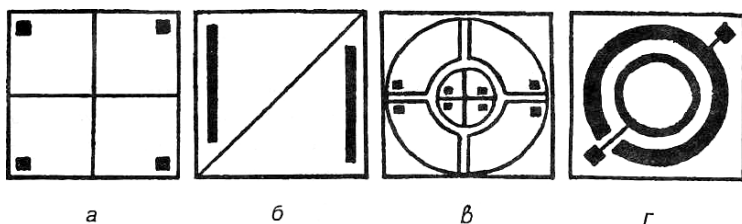


Рис. 2. Различные структурные конфигурации координатно-чувствительных фотодиодов с поперечным фотоэффектом: а - четырехэлементные; б - диагональные; в - восьмисегментные; г - кольцевые.

Координатно-чувствительные фотодиоды с поперечным фотоэффектом нашли широкое применение, как в гражданской фото-электронике (сейчас ни одно электронное устройство с лазерным диском не обходится без этого изобретения), так и в военной технике: ориентация по солнцу космических объектов, наведение ракет по лазерному лучу, акселерометры, лазерные гироскопы и другие [21].

На различных предприятиях России и за рубежом выполнен ряд опытно-конструкторских работ и налажен серийный выпуск координатно-чувствительных фотодиодов с поперечным фотоэффектом.

Так в НПО «Орион» разработаны и проводился выпуск более чем 7 модификаций, а на заводе «Сапфир» более чем 3-4 модификации. За рубежом квадрантные фотодиоды изготавливаются более чем на 7 фирмах стран США, Англии, Японии, Канады.

На фото 3 показаны конструктивные исполнения ряда координатно-чувствительных кремниевых фотодиодов с поперечным фотоэффектом.

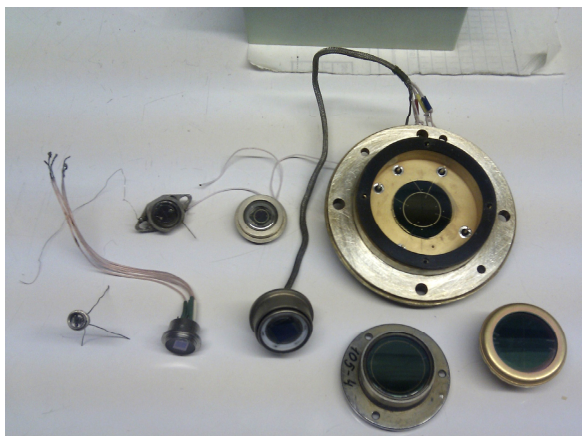


Рис. 3. Конструктивные исполнения ряда координатно-чувствительных кремниевых фотодиодов с поперечным фотоэффектом.

В настоящее время на предприятии НПО «Орион» проводится выпуск радиационно-стойких однокоординатных кремниевых фотодиодов с поперечным фотоэффектом.

Наибольший вклад в исследование, разработку и производство координатно-чувствительных фотодиодов с поперечным фотоэффектом внесли в России: Фример А.И., Тришенков М.А., Яценко И.И., Юнгерман В.М., Климанов Е.А., сотрудники завода «Сапфир», на Украине: Кролевец К.М. и ряд зарубежных фирм: Centronics, ENL, UDT, Namamatsu и другие.

Надеюсь, что координатно-чувствительному фотодиоду с поперечным фотоэффектом уготована еще долгая жизнь и это меня очень радует и доставляет большое моральное удовлетворение.

Литература.

1. Лисейкин В.П. Координатно-чувствительный фотодиод с поперечным фотоэффектом. Авторское свидетельство №31030 по заявке №952671 с приоритетом от 8 июля 1963г.
2. Лисейкин В.П., Тришенков М.А. Координатно-чувствительный бифотоэлемент. // Полупроводниковые приборы и их применение, 1966, вып. 16 с.22-27.
3. Williams T.L. Development and application of position-sensitive photocell. //Instrument Practice, 1965, №8 p. 733-734.
4. Boss V.M., Dreischicht-Photodioden, //Bulletin SEV, 1965, №6, p.185.
5. Baker L.R. Production of position-sensitive photocells. // Control, 1965, №9, p. 545.
6. Проспект фирмы ENL, California, august, 1966.
7. Тришенков М.А. Инерционные свойства координатно-чувствительного бифотоэлемента. // Физика и техника полупроводников, 1967, т.1, с. 1242.
8. Тришенков М.А., Фример А.И. К исследованию механизма электрической связи многоэлементных фотодиодов. // Физика и техника полупроводников, 1968, т.2, с. 169.

9. Лисейкин В.П. Никонов В.М. Тришенков М.А. Функциональный фотоэлектрический преобразователь на основе координатно-чувствительного бифотозлемента. // Автоматика и телемеханика 1969, №1, с. 156.
10. Sydenham P.H. Position-sensitive and their application to state and dimensional metrology. // Optica Aota, 1969, v.16, p.377.
11. Тришенков М.А. Фример А.И. Фотоэлектрические полупроводниковые приборы с р-п переходами. // Полупроводниковые приборы и их применение, 1971, вып. 25, с.195.
12. Артемов Ю.П., Бакумов Л.А., Благих В.П., Хесед Е.А., Хлявич Я.Л. // Измерительная техника №8, 1976, с.23.
13. Меркулов В.А. Шевцов. Позиционно-чувствительный фотоприемник для наведения на световой знак с изменяющейся освещенностью. // «ОМП», 1978, №10, с. 60.
14. Stech H. et. al. Improved fabrication method for quadrant type detector cell. // Electric Packaging and Production, 1974, №5, p. 101.
15. Климанов Е.А., Кулыманов А.В., Лисейкин В.П. Способы изготовления р-і-п фотодиода. Авторское свидетельство по заявке №2324746 с приоритетом от 21 апреля 1979г.
16. Климанов Е.А., Кулыманов А.В., Лисейкин В.П., Юнгерман В.М. О вольт-амперной характеристике кремниевого р-і-п диода большой площади, работающую в режиме полного истощения. // Радиотехника и электроника, т. XXI, №9, с. 1967г.
17. Каталог фирмы Centronics (Англия), март, 1973г.
18. Каталог фирмы ИДТ, США , июль 1986.
19. Каталог фирмы Hamamatsu, Япония, июль 1986.
20. Акимов В.М., Климанов Е.А. Лисейкин В.П., Тимофеев А.А., Щукин С.В., Юнгерман В.М. История, современное состояние и перспективы развития полупроводниковых матричных ИК-фотодиодных структур и технологий. // Прикладная физика №1, 1999, с.3.
21. Филачев А.М. Таубкин И.И. Тришенков М.А. Твердотельная фотоэлектроника, Издательство Физматгиз , 2005, С 75,76.

Б37 Светосильные объективы для неохлаждаемых тепловизионных модулей

Ульянова Е.О.

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», Новосибирск, Россия

Неохлаждаемые тепловизионные модули (НТПМ) широко используются в различных областях промышленности, системах охраны, экологического контроля, а также в системах специального назначения. НТПМ позволяют обнаружить замаскированные объекты, проводить разведку в сложных метеоусловиях, когда аппаратура, работающая в видимой области спектра, мало эффективна (ночь, туман).

В малогабаритных тепловизионных модулях в большинстве случаев используются неохлаждаемые матричные фотоприемные устройства (МФПУ). В настоящее время производством микроболометрических матричных приемников излучения и тепловизионных модулей на их основе занимается большое число фирм в России, США, Германии, Великобритании, Франции, Израиле и др. Хотя неохлаждаемые приемники излучения обладают меньшей чувствительностью и большей инерционностью по сравнению с охлаждаемыми МФПУ, тепловизионные

системы с такими приемниками имеют минимальные массогабаритные характеристики и не используют дорогостоящих устройств охлаждения, имеющих ограниченный ресурс наработки. Основным недостатком тепловизионных систем на основе неохлаждаемых микроболометрических приемников является то, что для формирования ИК-изображения требуется использование объективов с высокой светосилой.

При разработке объективов для малогабаритных НТПМ огромное значение приобретают массогабаритные характеристики. При этом объективы должны обеспечивать высокое качество изображения. Поэтому одной из основных задач, решаемых в процессе разработки объективов для НТПМ, является задача получения необходимых рабочих характеристик при минимальных массогабаритных параметрах.

В Филиале ИФП СО РАН «КТИ ПМ» разработаны светосильные объективы, которые формируют изображение в плоскости неохлаждаемого матричного фотоприемного устройства (МФПУ). В качестве фотоприёмного устройства применена неохлаждаемая болометрическая матрица фирмы ULIS (Франция), имеющая формат кадра 320×240 пикселей и шаг между чувствительными элементами 25 мкм .

Оптическая система первого разработанного и изготовленного объектива (Рис. 1) включает в себя четыре линзовых компонента, представляющих собой одиночные мениски, выполненные из германия и арсенида галлия. Все линзовые компоненты объектива имеют сферические поверхности. Оптическая система второго объектива (Рис. 2) включает в себя два линзовых компонента, представляющих собой мениски, выполненные из германия. Линзовые компоненты объектива имеют 3 асферических поверхности.

Представленные светосильные объективы рассчитаны для работы в спектральном диапазоне $8\text{-}11 \text{ мкм}$, имеют фокусное расстояние 45 мм , угол поля зрения $10,2 \times 7,6 \text{ град}$. Относительное отверстие объектива со сферическими поверхностями равно $1:0,8$, длина по оси составляет 77 мм , расчетная масса всех оптических компонентов, входящих в оптическую систему, составляет 140 г . Относительное отверстие объектива с асферическими поверхностями равно $1:1$, длина по оси составляет около 70 мм , расчетная масса всех оптических компонентов, входящих в оптическую систему, составляет 60 г .

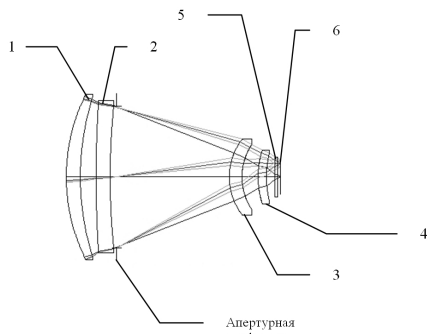


Рис. 1. Оптическая схема светосильного объектива со сферическими поверхностями для тепловизионных приборов на основе неохлаждаемых МФПУ.
1–4 – объектив; 5 – входное окно МФПУ; 6 – плоскость фоточувствительных элементов матричного ФПУ

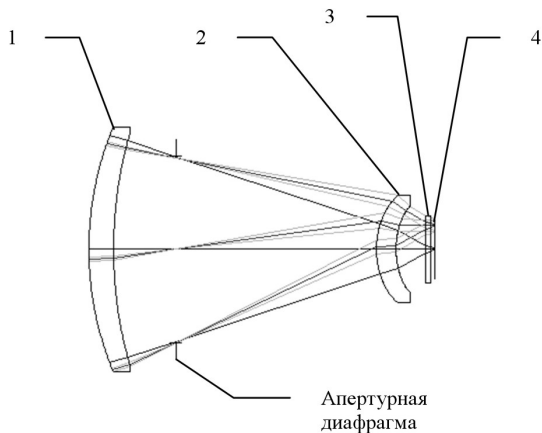


Рис. 2. Оптическая схема светосильного объектива с асферическими поверхностями для тепловизионных приборов на основе неохлаждаемых МФПУ
 1–2 – объективы; 3 – входное окно МФПУ; 4 - плоскость фоточувствительных элементов матричного ФПУ

Современный уровень развития неохлаждаемых тепловизионных модулей требует создания высококачественных малогабаритных оптико-электронных компонентов.

Разработанные светосильные объективы в полной мере отвечают поставленным требованиям, т.к. обладают необходимыми массогабаритными характеристиками, а также имеют разрешающую способность, позволяющую использовать их в составе малогабаритных тепловизионных модулей на основе неохлаждаемых МФПУ для решения задач обнаружения, распознавания и идентификации объектов наблюдения.

В38 Оптические системы тепловизионных приборов

Ульянова Е.О.

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», Новосибирск, Россия

Тепловизоры представляют собой широкий класс приборов, предназначенных для дистанционного контроля и детального исследования объектов наблюдения. Область применения тепловизионных приборов включает в себя медицину, геологоразведку, метеорологический и экологический мониторинг, системы охраны, специальные системы для разведки, наблюдения, боевого применения и т.д.

В состав тепловизионных приборов наряду с модулем фотоприемного устройства, модулем электронной обработки, модулем управления и источником питания входит оптическая система, которая формирует изображение в плоскости фотоприемного устройства (ФПУ). В зависимости от области применения тепловизионных приборов в их составе используются как охлаждаемые, так и неохлаждаемые ФПУ.

Выбор типа приемника для конкретной практической области применения – задача, требующая одновременного анализа самых различных и многочисленных факторов, в первую очередь относящихся как к техническим параметрам собственно

ФПУ и технологии его изготовления, так и к конкретным условиям его применения в составе тепловизионного прибора.

Вследствие различий в топологии и параметрах фотоприемных устройств возникает необходимость в сопряжении параметров и характеристик оптической системы с параметрами и характеристиками ФПУ. В связи с этим возникают различные концепции построения оптических систем для тепловизионных приборов.

Охлаждаемые матричные фотоприемные устройства (МФПУ) как правило, требуют охлаждения до достаточно низких температур, что заметно усложняет конструкцию ФПУ и всего тепловизионного прибора [1]. Однако сегодня технология их производства достаточно хорошо освоена, серийно изготавливаются МФПУ самых различных форматов. Тепловизионные системы, в которых они используются, характеризуются высоким геометрическим и энергетическим (температурным) разрешением.

В Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ» разработаны и изготовлены оптические системы для тепловизионных приборов на основе охлаждаемых МФПУ. Разработанные оптические системы формируют изображение в плоскости матричного фотоприемного устройства (МФПУ) с форматом кадра 320×256 элементов и шагом между чувствительными элементами 30 мкм. Оптическая схема одной из разработанных и изготовленных оптических систем для тепловизионных приборов на основе охлаждаемых МФПУ представлена на Рис.1. Разработанные оптические системы могут быть сопряжены с охлаждаемыми МФПУ как фирмы «Sofradir», так и с охлаждаемыми матричными приемниками, разработанными в ИФП СО РАН и ФГУП «НПО «Орион», форматы и технические характеристики которых позволяют создавать матричные тепловизионные приборы, аналогичные зарубежным.

В последнее десятилетие при создании недорогих тепловизионных приборов массового применения четко прослеживается тенденция использовать неохлаждаемые матричные ФПУ. Хотя они обладают меньшей чувствительностью и большей инерционностью по сравнению с охлаждаемыми МФПУ, системы с такими приемниками не используют дорогостоящих устройств охлаждения, имеющих ограниченный ресурс наработки.

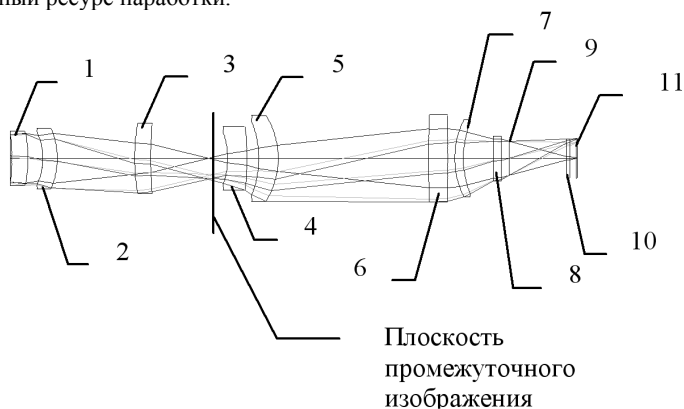


Рис. 1. Оптическая схема оптической системы для тепловизионных приборов на основе охлаждаемых МФПУ

1-3 – входной объектив; 4-7 – проекционная система; 8 – входное окно криостата; 9 – охлаждаемая диафрагма; 10 – охлаждаемый фильтр; 11 – плоскость фоточувствительных элементов матричного ФПУ

В Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ» разработаны и изготовлены оптические системы для тепловизионных приборов на основе неохлаждаемых МФПУ. Оптические системы формируют изображение в плоскости матричного фотоприемного устройства (МФПУ). В качестве фотоприёмного устройства применена неохлаждаемая болометрическая матрица фирмы ULIS (Франция), имеющая формат 160×120 пикселей с шагом 35 мкм. На Рис. 2 представлена одна из разработанных и изготовленных оптических систем для тепловизионных приборов на основе неохлаждаемых МФПУ.

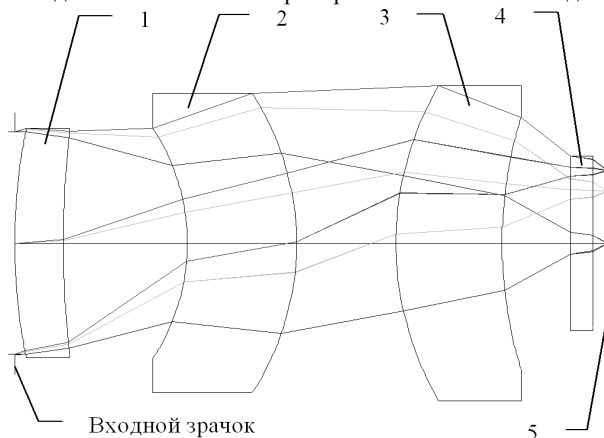


Рис. 2. Оптическая схема оптической системы для тепловизионных приборов на основе неохлаждаемых МФПУ

1–3 – объектив; 4 – входное окно МФПУ; 5 - плоскость фоточувствительных элементов матричного ФПУ

В докладе приведены основные параметры и характеристики оптических систем тепловизионных приборов на базе МФПУ различного типа, работающих в спектральном диапазоне 8-12 мкм. Представлены их оптические схемы, а также параметры оценки качества изображения разработанных оптических систем в сравнении с дифракционно-ограниченными системами.

Литература

[1] В.В.Тарасов, Ю.Г.Якушенков, в кн. *Инфракрасные системы «смотрящего» типа*, Логос, М. 2004, с. 94.

Б39 Схемы построения объективов тепловизионных приборов

Ульянова Е.О.

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», Новосибирск, Россия

В докладе представлены различные схемы построения объективов тепловизионных приборов для работы в спектральном диапазоне 8-12 мкм, приводятся основные параметры и характеристики объективов, а также приведены их оптические схемы и оценка качества изображения.

С целью усовершенствования одной из базовых оптических систем [1] была разработана и изготовлена оптическая схема высокоапертурного объектива для матричного фотоприемного устройства. Схема объектива включает в себя фронтальный компонент, состоящий из двух одиночных линз со сферическими поверхностями, а также базовый (проекционный) блок из трех оптических компонентов, первые два из которых, имеют сферические поверхности, а третий оптический компонент имеет переднюю сферическую и заднюю асферическую поверхности. Все оптические компоненты выполнены из германия и селенида цинка. Особенностью разработанной оптической системы объектива является применение промежуточной плоскости изображения, расположенной между двухлинзовым фронтальным компонентом и трехлинзовым базовым блоком, что позволяет установку механизма микросканирования и устройств калибровки в месте наименьших световых диаметров, а также применение взаимозаменяемых фронтальных компонентов с другим фокусным расстоянием, что позволяет построить оптическую систему с переменным фокусным расстоянием (полем зрения), не меняя при этом проекционную часть, а также положение относительно фотоприемного устройства. В представленной оптической схеме возможно уменьшение фонового потока за счет формирования апертурной диафрагмы в холодной зоне. В этих целях выходной зрачок оптической системы объектива совмещается с холодной диафрагмой, находящейся внутри криостатированного корпуса [2]. Разработанная оптическая схема объектива позволила значительно уменьшить массогабаритные характеристики фронтальных оптических компонентов схемы и, как следствие, оптической системы в целом. Использование режима микросканирования позволяет увеличить формат кадра с 320 на 256 чувствительных элементов до 640 на 512 элементов, т.е. возможно получение формата кадра в 2 раза большего, чем исходный, что повышает разрешающую способность системы.

Материалы линзовых и других компонентов многих оптических систем, работающих в ИК-области спектра, обычно имеют высокие показатели преломления ($n=2,4-4,0$). Это приводит к заметному увеличению потерь на отражение на границах раздела воздуха и материала оптической детали. Для сравнительно широкого спектрального рабочего диапазона, даже при наличии многослойного просветления, потери на отражение могут быть весьма велики. Увеличение коэффициента пропускания особенно важно для оптических систем, работающих в длинноволновом оптическом диапазоне 8-14 мкм, поскольку контрасты между низкотемпературными объектами и фонами здесь малы, а коэффициенты пропускания многих оптических материалов сравнительно невелики [2]. Для повышения коэффициента пропускания всей оптической системы необходимо сократить количество ее компонентов. Одним из способов уменьшения количества компонентов в оптической системе объектива является использование асферических поверхностей. Асферическая поверхность последнего компонента базового блока в разработанной оптической системе объектива представляет собой четную асерику четвертого порядка.

Разработанный и изготовленный в Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ» объектив формирует изображение в плоскости охлаждаемого МФПУ с форматом кадра 320×256 элементов и шагом между чувствительными элементами 30 мкм. Оптическая схема объектива тепловизионных приборов на основе охлаждаемых МФПУ представлена на Рис.1. Объектив рассчитан для спектрального диапазона 7,7-10,3 мкм, имеет фокусное расстояние 250 мм, относительное отверстие 1:1,92, поле зрения $2,75^\circ$ и длину по оси порядка 360 мм. Расчетная масса всех оптических компонентов, входящих в объектив, составляет порядка 800 г.

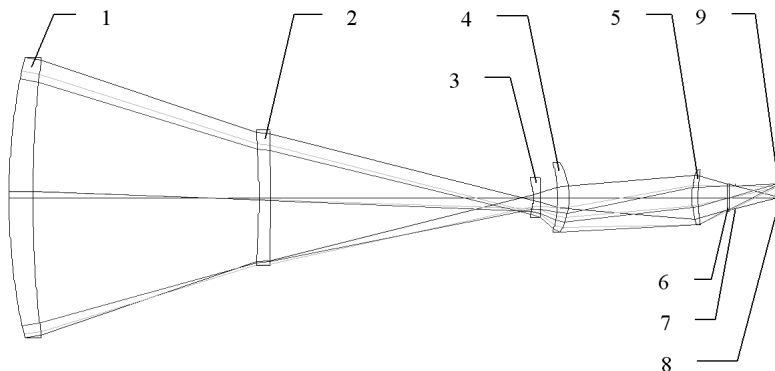


Рис. 1. Оптическая схема объектива тепловизионных приборов на основе охлаждаемых МФПУ

1-2 – фронтальная часть объектива; 3-5 – проекционная часть объектива;

6 – входное окно криостата; 7 – охлаждаемая диафрагма; 8 – охлаждаемый фильтр; 9 – плоскость фоточувствительных элементов матричного ФПУ

Качество изображения разработанного объектива оценивается с помощью радиуса кружка рассеяния, параметров модуляционной передаточной функции и функции концентрации энергии. Геометрический радиус пятна рассеяния точки на оси не превышает величину 16,5 мкм в центре поля зрения и 22 мкм на краю поля зрения. Для пространственной частоты 30 мм^{-1} коэффициенты передачи контраста для центра и края поля зрения равны соответственно 0,31 и 0,19. Значения функции концентрации энергии в пятне радиусом 15 мкм для оси и для края поля зрения соответственно составляют 0,69 и 0,64.

Представленный объектив обладает хорошим качеством изображения, позволяющим использовать его в тепловизионных приборах на основе охлаждаемых МФПУ для решения задач обнаружения, распознавания и идентификации объектов наблюдения.

Литература

1. К.П. Шатунов. Особенности построения оптических систем тепловизионных приборов с матричными фотоприемными устройствами КРТ// Современные проблемы геодезии и оптики: Сборник материалов ЛШ Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию СГГА, 11 – 21 марта 2003 г. – Ч. III. - Новосибирск: СГГА, 2003. С. 70-72.

2. В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков, в кн. *Инфракрасные системы «смотрящего» типа*, Логос, М. 2004, с. 94-96.

Б40 Метод измерения пороговой мощности высокочувствительного матричного тепlopеленгатора

Титов А.Г., Винецкий Ю.Р., Забенькин О.Н.,

Филиал ОАО «ПО УОМЗ» Урал-Геофизика», Москва, Россия

Существующие в настоящее время методики контроля основных показателей качества тепловизоров (ТпВ) направлены, прежде всего, на измерение температурно-

пространственного (контрастного) разрешения, что отвечает основной задаче ТПВ – воспроизведение температурного поля с максимальной точностью.

В отличие от ТпВ, тепlopеленгатор (ТП) должен обеспечивать обнаружение сигналов на заданной дальности при заданной вероятности ложных срабатываний и заданной вероятности правильного обнаружения. Современные методы коррекции неоднородности чувствительности тепловизоров, целью которых является получение с каждого пиксела ФПУ сигнала одного и того же уровня, позволяют снизить геометрический шум до уровня временного. При этом необходимо иметь в виду, что в результате такой коррекции отдельные фоточувствительные ячейки могут иметь повышенный временной шум. Ситуация усугубляется наличием негауссовых шумов. В результате, при высоких традиционных показателях качества, может существовать повышенная вероятность появления надпороговых импульсов при отсутствии цели.

Для адекватного количественного контроля ТП нами разработана методика измерения пороговой мощности (ΔP_0) – основного параметра, характеризующего пороговые свойства тепlopеленгатора в целом. Под пороговой мощностью понимается минимальное значение разности потоков сигнальной и фоновых ячеек, при котором обеспечивается пеленгация с заданными вероятностями.

В высокочувствительных ТП величина ΔP_0 имеет столь низкие значения, что вытекающие требования к стабилизации температуры фона становятся трудно реализуемыми. В связи с этим особенностью предлагаемой методики является создание таких условий, при которых величина ошибки, вносимой за счет неточного измерения фона, минимизируется. Показано, что для этого достаточно уменьшать, по крайней мере, до субпиксельного уровня видимый размер тела излучения имитатора тест-объекта, одновременно повышая его температуру. Представлен анализ погрешностей измерений, определены оптимальные значения параметров измерительной установки, даны практические примеры измерений пороговой мощности высокочувствительного ТП.

Б41 Использование тонкопленочной эвтектики In-Sn для формирования микроконтактов в матричных ФПУ

Ефимов В.М., Валишева Н.А.

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

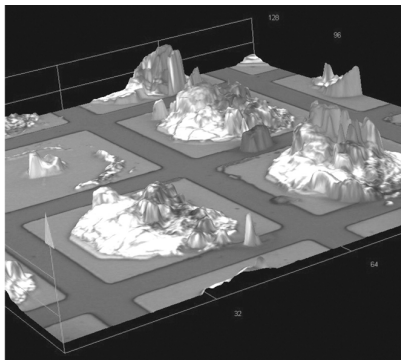
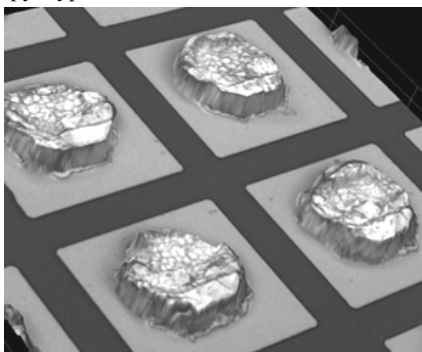
Чрезвычайно высокая окисляемость индия создаёт большие проблемы при гибридизации охлаждаемых матричных фотоприемных устройств (ФПУ). Окисление индия в естественных условиях происходит за десятки секунд, и, в дальнейшем, от этого окисла практически невозможно избавиться. В результате соединение кремниевое коммутатора и фотоприемной матрицы получается сильно ослабленным, что приводит к ускоренному разрушению гибридных микросхем при их эксплуатации в процессе многократных циклов охлаждение-нагревание. Для матриц большой размерности, с расстоянием 15-20 мкм между элементами ФПУ, проблема ещё более обостряется, поскольку естественный окисел индия чрезвычайно затрудняет даже начальную сборку микросхемы: при малом расстоянии между элементами уже нельзя производить существенную деформацию индиевых микроконтактов если их соединение осуществляется методом «холодной сварки». Но при снижении давления сварки даже частичного разрушения окисной пленки не происходит и «холодная сварка» вообще неосуществима.

Для формирования индиевых микроконтактов для матричных ФПУ нами была применена исходная структура In+Sn [1]. Существенно, что слой олова в такой

структуре формировался очень тонким, по сравнению со слоем индия, что позволило практически не изменять процесс травления индиевого слоя, но защитную, от окисления, функцию олово выполняло. Напыление металлов осуществлялось в вакууме в едином процессе. Таким образом, исключалось образование естественного окисла на поверхности индия, после того как образец вынимался в комнатную атмосферу. При этом основная идея использования такой структуры заключалась в следующем: известна гомогенная смесь индия (52%) и олова (48%), образующая эвтектику, с температурой плавления 117°C [2]. Но именно такое соотношение этих элементов имеет место на границе раздела двух металлов в нашей двухслойной структуре.

Толщина слоя олова, исследованных образцов выбиралась минимальной (около 0,1 мкм), при толщине слоя индия 5-7 мкм. Далее методом «перевернутого кристалла» (Flip-chip), при малом давлении проводилось соединение матричных кристаллов на основе InAs с кремниевым матричным коммутатором. После этого сборка нагревалась для сплавления микросоединений по границе раздела.

Контроль процесса соединения осуществлялся визуально, разрывом соединенных кристаллов, измерением сдвиговое усилие разрыва сборок до сплавления и после него и определением температуры плавления микроконтактов. Визуальный контроль осуществлялся на лазерной конфокальной сканирующей системе LTXT OLS4000. Затем разрывалась для визуального контроля качества соединения встречных микроконтактов. Визуальный контроль осуществлялся на лазерной конфокальной сканирующей системе LTXT OLS4000. Ниже на двух рисунках показаны, полученные таким образом, изображения разорванных микросоединений для двух случаев: соединения In+In (слева) и соединения (In+Sn)-(Sn+In) - справа. Хорошо видно, что при отсутствии защитного оловянного слоя индиевые микросоединения фактически не сплавляются: разрыв происходит по границе встречных микроконтактов. При наличии оловянной пленки происходит полное сплавление, так что при разрыве образуются индиевые «тяжи». Измерение сдвигового усилия разрыва структур In+Sn+Sn+In также показало существенное его увеличение по сравнению со структурами In+In.



Визуальный контроль сплавления подтверждается и экспериментами по термоциклированию матричныхборок. Для соединений In-In после нескольких сотен циклов: охлаждения до температуры жидкого азота с последующим нагреванием до комнатной температуры, разрыв микроконтактов начинается с углов матриц. В случае же микроконтактов, защищенных оловянной пленкой, характер дефектообразования при термоциклировании качественно меняется: после достаточно большого количества термоциклов, в некоторых областях матричного соединения постепенно

образовывались микрозакоротки соседних пикселей, но угловые области при этом остаются неразрушенными.

Литература.

1. В. М. Ефимов, Индиевые микроконтакты для гибридной микросхемы, патент РФ, № 2411610, 2011.
2. William J. Parrish, Jeffrey B. Barton, Method for electrically interconnecting large contact arrays using eutectic alloy bumping, US Patent № 6550665, 2003.

Б42 Исследование диффузии цинка в фосфид индия и гетерозитаксиальные структуры $n\text{-InP}/n\text{-In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/n^+\text{-InP}$ для применения ее в технологии фоточувствительных элементов

²Андреев Д.С., ¹Мармалюк А.А., ¹Горлачук П.В., ²Хакуашев П.Е., ²Чинарева И.В.

¹ ФГУП «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, Москва, Россия

² ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

Целью данной работы является исследование диффузии цинка в фосфид индия и гетерозитаксиальные структуры $n\text{-InP}/n\text{-In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/n^+\text{-InP}$ для применения ее в технологии фоточувствительных элементов. Исследованы профили распределения концентрации носителей заряда в диффузионных структурах. В работе определен коэффициент диффузии цинка в монокристаллическом и эпитаксиальном InP, в гетероструктурах $n\text{-InP}/n\text{-In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/n^+\text{-InP}$. Подобрана формула, удобная для практических расчетов времени диффузии в зависимости от толщины эпитаксиального слоя. Показано, что данный технологический процесс может быть использован в технологии изготовления pin-фотодиодов на основе гетерозитаксиальных структур. Приведены вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики фотодиодов $n\text{-InP}/n\text{-In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/n^+\text{-InP}$.

Б43 Growth and Characterization of InGaAs on InP for IR Detectors (Выращивание и характеристики InGaAs на InP для ИК фотоприемных устройств)

Suleyman Ozcelik, Tarik Asar, S. Sebnem Cetin, Kursad Kizilkaya, Baris Kinaci, Yunus Ozen and Tofig Memmedli

Photonics Application and Research Center, Gazi University, Ankara, Turkey

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ternary alloys is a direct-gap semiconductor for any value of x . $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ structure is lattice match to InP. Due to its high-carrier transportation properties and low band-gap energy $E_g=0,74$ eV, this structure is important for electronics and optoelectronics devices such as field effect transistor as well as modulators and detectors of near infrared radiation. In this study, n -type $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ alloy was grown on $n\text{-InP}$ substrate by solid-source VG80 MBE system. The crystallinity and optical properties of the structure were investigated with high resolution X-ray diffraction and photoluminescence measurements. In addition the surface morphology of the sample was analyzed by atomic force microscopy. The IR photo-detector was fabricated on the structure. Spectral noise, detectivity and power of equivalent power of the device were measured as $>10\text{-}14$ A/Hz^{1/2}, $3,1\cdot 10^{11}$ cm·Hz^{1/2}/W and $5,7\cdot 10^{-14}$ W, respectively.

This work has been supported by DKB with project number: 2011K120290

B44 Fabrication of AlGaAs/GaAs QW Laser Diode (Изготовление AlGaAs/GaAs QW диодных лазеров)

Tofiq Memmedli, Tarik Asar, S. Sebnem Cetin, Emre Piskin, H. Ibrahim Efkerе,
Gurkan Kurtulus and Suleyman Ozcelik

Photonics Application and Research Center, Gazi University, Ankara, Turkey

In this work $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ QW laser diode structure was grown on GaAs (100) substrate by solid-source VG80 MBE system. The crystallinity and optical properties of the structure were investigated with high resolution X-ray diffraction and photoluminescence measurements. The laser diode was fabricated and characterized. The spectral behavior and optical power of the laser are measured. The peak position of the optical spectra and optical power at 100 mA of the laser diode is 810,5 nm and 10 mW, respectively.

This work has been supported by DKB with project number: 2011K120290

B45 Совершенствование технологических операций подготовки к заполнению микрокриогенных систем криоагентом

Самвелов А.В., Широков Д.А., Сысоев Д.А., Оганесян Н.Н.

ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

Зависимости показывают, что разница между потребляемой стационарной мощностью при промывке МКС базовым циклом (20 циклов, 20 атм.) и циклом, полученным расчётным путём (6 циклов, 10 атм.), несущественна. Однако при продолжении уменьшения давления и сокращения количества циклов промывки, потребляемая мощность МКС значительно возрастет. Возросшая потребляемая мощность МКС – индикатор некорректной работы системы, это может привести к сокращению срока службы системы при дальнейшей её эксплуатации. Таким образом, можно сказать, что промывка МКС при давлении 10 атм. с 6 циклами впуска/выпуска является технологически оптимальной.

Доказано, что оптимальное давление промывочного гелия составит 10 атм. при количестве циклов промывки не менее шести для достижения в конечном цикле концентрации примесей в объёме МКС, соизмеримой с концентрацией примесей в баллоне газообразного гелия 99,9999%. Эксперименты полностью подтвердили расчёт.

В используемой базовой технологии изготовления МКС предусмотрено большее число циклов промывки (20 циклов), сопровождавшееся более высокими значениями давления промывки (20 атм.).

Проведённые исследования направлены на оптимизацию существующей технологии в части снижения норм времени операций промывки и экономии гелия, являющегося редким дорогостоящим веществом.

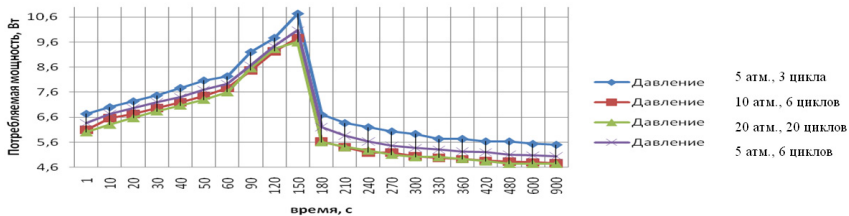


Рисунок. Зависимости и потребляемой мощности от времени наработки МКС при различных количествах циклов промывки и давлений промывки

Б46 Ускоренные испытания на безотказность микрокриогенных систем для матричных фотоприёмных устройств

Еремчук А.И., Оганесян Н.Н., Патрашин А.И., Самвелов А.В., Сысоев Д.А., Широков Д.А.

ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

МКС Стирлинга широко используются как активные охладители фоточувствительных элементов МФПУ для обеспечения фотоэлектрических характеристик: пороговой облучённости; пороговой мощности, ограниченной шумом; обнаружительной способности; ограниченной шумом разности температур и др. Одним из важнейших условий эксплуатации МФПУ, выдвигаемых потребителем, является среднее время наработки до отказа. МКС, как составная часть МФПУ, должна, в свою очередь, соответствовать всем эксплуатационным требованиям, предъявляемым к МФПУ. Поэтому на МКС, предназначенных для криостатирования МФПУ, разработана методика испытаний на безотказность, включающая в себя два метода:

Метод 1 – непрерывные испытания, длительностью 120 часов с разбивкой на 12 временных интервалов;

Метод 2 – циклические испытания, содержащие 500 циклов «включения-выключения».

Объектом исследования являются два опытных образца МКС предназначенных для охлаждения МФПУ в процессе испытаний безотказности. Средняя наработка МКС до отказа в типовом режиме эксплуатации при температуре криостатирования 80 К, потребляемой мощности в стационарном режиме не более 8 Вт, времени выхода на стационарный режим не более 300 секунд, должна быть не менее 8000 ч при не менее, чем 800 включениях-выключениях.

Метод 1. Максимальное время непрерывной работы МКС – 10 часов. Перерыв между циклами непрерывной работы – 40 мин. За время испытаний МКС должна обеспечивать 12 циклов включения. Типовой режим эксплуатации – НКУ.

Наработка состоит из последовательности одинаковых циклов непрерывной работы, состоящих из включения МКС, непрерывной работы в течение 10-ти часов и выключения изделия. Полная наработка изделия при испытании составляет 120 ч (12 циклов непрерывной работы). Модель отказов МКС – экспоненциальная.

В данном методе по измеренным значениям потребляемой мощности строится кривая $N_{изм}(t)$. Определяются начальное и конечное значения измеряемого параметра $N_{изм}(0)$ и $N_{изм}(120ч)$. МКС считается годной по безотказности, если $N_{изм}(120 ч) \leq N_p(120 ч)$, температура криостатирования составляет 80 К, а время выхода на режим не превышает пяти минут.

Метод 2. Время работы МКС – 5 минут (от включения до выключения). Время отогрева (время между выключением МКС и последующим включением) – 50 мин. За время испытаний МКС должна обеспечить 500 циклов включения-выключения. Типовой режим эксплуатации – НКУ. Полная наработка изделия при испытании составляет 125 часов. Модель отказов МКС – экспоненциальная.

В этом методе по измеренным значениям потребляемой мощности строится кривая $N_{изм}(n)$. Определяются начальное и конечное значения потребляемой мощности измеряемого параметра $N_{изм}(0)$ и $N_{изм}(500)$. МКС считается годной по безотказности, если $N_{изм}(500) \leq N_p(500)$, температура криостатирования составляет 80 К, а время выхода на режим не превышает пяти минут.

Цель исследований – определение средней наработки МКС до отказа. Исследуемым параметром при испытаниях являлась потребляемая мощность в стационарном режиме (N) при заданной температуре криостатирования, контролируемым параметром являлось время выхода на стационарный режим (τ).

Представлены результаты исследования работы двух опытных образцов МКС для криостатирования МФПУ в двух разных режимах: использующих 10-ти часовые циклы и циклы включения-выключения. В процессе испытаний отказов МКС не выявлено, температура криостатирования поддерживалась на уровне 80К, время выхода на стационарный режим не превышало пяти минут. Рассмотрены зависимости стационарной мощности и времени выхода на режим от времени наработки и от количества циклов включений-выключений. Исследования показали, что при работе первого образца МКС в режиме 10-часовых циклов ожидаемое среднее время наработки до отказа по стационарной мощности потребления составит 17540 часов. При работе второго образца МКС в режиме включения-выключения ожидаемое среднее время наработки до отказа по стационарной мощности потребления составит 167600 циклов или 13967 часов непрерывной работы.

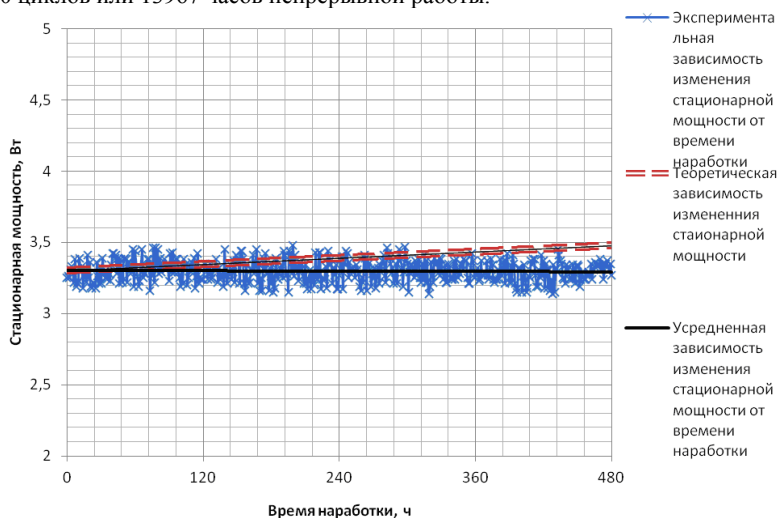


Рис.1 Зависимость стационарной мощности полученной по методу 1 от времени наработки и расчетная зависимость изменения стационарной мощности.

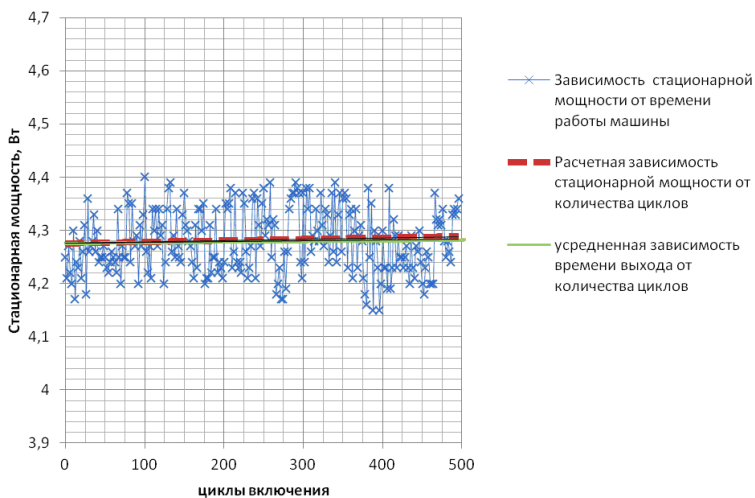


Рис. 2. Зависимость стационарной мощности полученной по методу 2 и расчётное значение мощности от номера цикла

Эти результаты показывают, что основным источником отказа МКС по потребляемой мощности является повышенное потребление мощности в период выхода на стационарный режим, так как в этом периоде существенно повышена нагрузка на двигатель МКС и внутренние движущиеся части системы. Во время стационарной работы МКС, двигатель работает на значительно меньших оборотах, что позволяет продлить срок службы МКС.

Б47 Групповой способ создания In столбков высотой до 10 мкм на полупроводниковых пластинах размером до 100 мм методом «взрывной» фотолитографии

Лисейкин В.П., Микертумянц А.Р., Еремчук А.И., Акимов В.М., Васильева Л.А., Широков С.В.

ФГУП «НПО «Орион» Москва Россия

При создании матричных ИК фотоприемных устройств (МФПУ) широко используется гибридный способ изготовления посредством стыковки матричных ИК фотоприемников с Si матричными мультиплексорами с помощью In столбиков.

При этом для надежности работы гибридных МФПУ, при температуре жидкого азота 77 К, высота In столбиков должна быть ~9-10 мкм. Кроме того, омическое контактное сопротивление между In и Al пленкой должно быть $\leq 50-100$ Ом и иметь хорошую адгезию между In и металлической контактной площадкой истока входного МДП транзистора.

Известно, что при использовании Al металлической разводки в Si матричных МОП или КМОП структурах, на поверхности Al контактных площадок образуется диэлектрическая пленка Al_2O_3 , которая будет создавать большое сопротивление и плохую адгезию между In и Al. В настоящее время для формирования In столбиков используются разные методы [1]:

- гальваническое осаждение In;

- напыление In термическим испарением через металлическую маску;
- термическое испарение In с помощью прямой фотолитографии [2] и обратной фотолитографии [3].

Каждому методу присущи свои достоинства и недостатки. Однако наиболее оптимальным является групповой метод взрывной ФЛГ, позволяющей создавать In столбики на пластинах диаметром до 100 мм к матричным структурам с шагом до 15 мкм, как на Si матричных мультиплексорах, так и на ИК матричных фотодиодах из InSb и КРТ.

В данной работе рассматривается групповой метод создания In столбиков к матричным структурам формата 256x256, 384x288, 640x512 и решение вопроса малого контактного сопротивления и хорошей адгезии In с Al поверхностью.

Для удаления диэлектрической пленки Al_2O_3 на поверхности Al использовались три вида травителей: 1. КОН (0,7%); 2. специальный травитель Al_2O_3 (на основе CrO_3 и H_3PO_4); 3. буферный травитель.

Наиболее оптимальным оказался травитель на основе КОН. Далее после фотолитографии контактных окон и обработки их этим травителем последовательно наносились методом магнитронного распыления пленки Cr толщиной $\sim 200 \text{ \AA}$ и никеля толщиной $\sim 800 \text{ \AA}$, которые выделялись методом взрывной фотолитографии. В результате такой операции получены малое омическое сопротивление $< 50\text{-}100 \text{ Ом}$ и в последующем хорошая адгезия In с поверхностью Al контактных площадок истоков всех входных МДП транзисторов матричных мультиплексоров на пластине.

Далее рассматривается взрывной метод создания In столбиков с использованием одного позитивного фоторезиста и одного слоя Mo для создания полости, свободной от фоторезиста в каждой ячейке матрицы.

Последовательность операций была следующей:

На кремниевую пластинку с кристаллами БИС считывания последовательно наносили два слоя позитивного фоторезиста толщиной $\sim 6 \text{ мкм}$, с последующей сушкой на плитке. Далее происходит перенос меток совмещения с поверхности БИС считывание на поверхность верхнего слоя фоторезиста. Затем напылялась пленка Mo или V и проводилась фотолитография с последующим травлением Mo и фоторезиста под будущие In столбики до поверхности Ni в истоках входных МОП транзисторов.

После формирования маски с колодцами в ячейки глубиной $\sim 12 \text{ мкм}$ напылялась термическим испарением пленка In необходимой толщины 9-10 мкм. Далее осуществляется «взрыв» фоторезиста в органическом растворителе. Индиевые столбики образовывались на всей полупроводниковой пластине диаметром до 100 мм. Данный метод внедрен на Si матричных мультиплексорах форматов 384x288 и 256x256. Получены первые тестовые результаты на матрице формата 640x512. Проводятся работы по внедрению взрывной фотолитографии на ИК матричных структурах из материалов InSb и КРТ.

На рис. 1, 2 показаны фотографии с растрового электронного микроскопа, а на рис. 3 общий вид матриц In столбиков на пластинах диаметром 76 мм и 100 мм.

Литература.

1. Акимов В.М., Климанов Е.А., Лисейкин В.П., Микертумянц А.Р., Седнев М.В., Сергеев В.В., Шелоболин Л.А. О взрывном способе изготовления систем металлизации и микроконтактов в БИС считывания. фотосигнала // Прикладная физика, №4, 2010Ю с. 99.

2. Акимов В.М., Васильева Л.А., Каган Н.Б., Климанов Е.А., Курбет И.Ю. Лисейкин В.П., Микертумянц А.Р., Седнев М.В., Серегина Н.Н., Шукин С.В. Методы создания систем металлизации с индиевыми микроконтактами для кремниевых матричных МОП мультиплексоров // Прикладная физика, №1, 2008, с. 71.

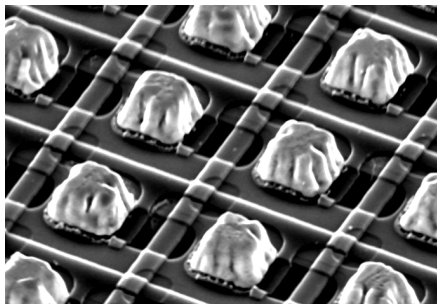


Рис. 1

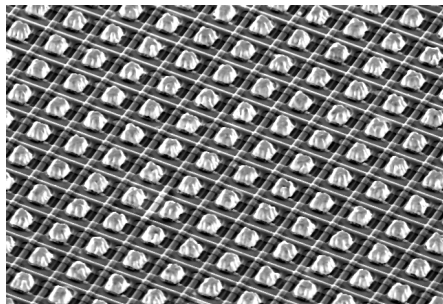


Рис.2

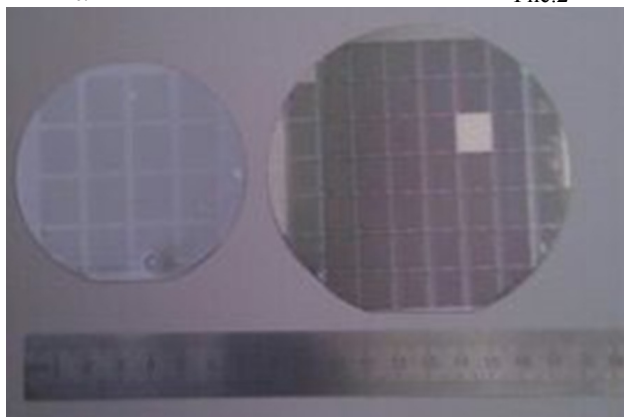


Рис. 3

Б48 Исследование пассивирующего покрытия теллурида кадмия, выращенного на поверхности эпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$

¹Кашуба А. С., ¹Колмакова О.А., ¹Сизов А.Л., ¹Мирофьянченко А.Е., ¹Пермикина Е.В., ^{1,3}Бурлаков И.Д., ²Демин А.В.

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² ВНИИОФИ, Москва, Россия

³ МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

В настоящее время разработана промышленная технология изготовления приборов ночного видения для инфракрасной спектральной области. Одним из основных процессов технологии является пассивация поверхности эпитаксиального рабочего слоя гетероструктур теллурида кадмия-ртути (ГЭС КРТ) методом «горячая стенка». В настоящее время процесс нанесения пассивирующего покрытия теллурида кадмия хорошо отработан. Но, несмотря на это, увеличение числа ростовых дефектов на поверхности исходных ГЭС КРТ приводит к нарушениям электрической стабильности границы раздела полупроводник/пассивирующий слой, вплоть до

возникновения лавинного пробоя из-за инверсионного канала в приборе на границе раздела КРТ теллурид кадмия.

В данной работе приведены результаты исследования морфологии поверхности пассивирующего покрытия из CdTe на ГЭС КРТ (310) в результате проведения следующих технологических этапов изготовления МФПУ: травление поверхности КРТ, нанесение пассивирующего теллурида кадмия и проведение термического отжига. Исследования проводились методами атомно-силовой и электронной микроскопии высокого разрешения, генерации второй оптической гармоники и методом Холла.

Оказалось, что после травления шероховатость поверхности гетероструктур увеличивается в два, а после пассивации – в три раза по сравнению с исходной поверхностью ГЭС КРТ. Исследование пассивирующего покрытия методом генерации второй оптической гармоники показало, что слой теллурида кадмия не является монокристаллическим, а представляет собой слоистую структуру. Это объясняется характерными особенностями травления (скорость травления всегда больше в углублениях и бороздах поверхности) и особенностями роста теллурида кадмия на КРТ методом «горячая стенка» (рост слоев теллурида кадмия происходит в соответствии с моделью Волмера–Вебера). Нанесение пассивирующего покрытия при более высоких температурах на подложке хотя и приводит к улучшению морфологии поверхности, но изменяет состав КРТ из-за большого испарения ртути с поверхности образца. Моделью трехмерного роста Волмера–Вебера объясняется непригодность для пассивации покрытий CdTe толщиной менее 0,4 мкм наличием на поверхности КРТ свободных от теллурида кадмия площадок, которые зарастают с увеличением толщины покрытия, что хорошо заметно при исследовании поверхности методом АСМ.

При сравнении морфологии поверхности пассивирующего покрытия теллурида кадмия различных толщин методами АСМ и РЭМ оказалось, что слои толщиной около 1 мкм имеют более гладкую зеркальную поверхность, тонкие слои (менее 0,5 мкм) отличаются шероховатым рельефом, представляющим собой сочетание наиболее высоких холмиков и глубоких впадин. В результате проведения термического отжига в течение 20-30 часов шероховатость поверхности теллурида кадмия сглаживается, улучшается морфология поверхности, увеличивается емкость пассивирующего покрытия и уменьшаются токи утечки, то подтверждается изучением вольт-фарадных характеристик образцов Mo/CdTe/КРТ.

Изучение пассивирующего покрытия теллурида кадмия методом Холла подтверждает, что длительная температурная обработка способствует увеличению проводимости, возрастанию концентрации основных носителей в приповерхностном слое и уменьшению подвижности носителей заряда.

Представлены результаты наблюдения ростовых V-дефектов в результате технологического травления поверхности ГЭС КРТ и последующей ее пассивации. После травления размеры поликристаллитов V-дефекта заметно сокращаются, исходная высота составляющая около 1,5 мкм уменьшается до десятков нанометров и менее. После пассивации поверхность V-дефекта сглаживается, но, несмотря на это поликристаллический характер V-дефекта приводит к созданию дополнительных энергетических уровней в запрещенной зоне на границе раздела CdTe/HgCdTe, и, следовательно, к увеличению объемного заряда. Поэтому увеличиваются токи утечек, и возникает на границе раздела инверсионный канал, что отрицательно сказывается на параметрах МФПУ. Поверхностная плотность V-дефекта на исследуемых образцах в последнее время составляет до $(7\div 8) \cdot 10^2$ шт/см². Это ухудшает фотоэлектрические характеристики МФПУ.

Б49 Исследование ростовых дефектов, влияющих на фотоэлектрические характеристики матричных фотоприемных устройств на основе гетероэпитаксиальных структур $Cd_xHg_{1-x}Te$

¹Пермикина Е.В., ¹Кашуба А.С., ¹Ляликов А.В., ¹Коротаев Е.Д., ^{1,2}Бурлаков И.Д.,

¹ ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

² МИРЭА (Технический университет), Москва, Россия

Исследованы ростовые V-дефекты в эпитаксиальных слоях гетероструктур $Cd_xHg_{1-x}Te$ (полученных молекулярно-лучевой эпитаксией на подложках из GaAs ориентации (310)) методами атомно-силовой и электронно-ионной микроскопии высокого разрешения, в том числе с ионным протравливанием поперечных разрезов в глубину структуры в сочетании с атомно-силовой микроскопией и селективным травлением поверхности.

Результаты исследования показали, что V-дефекты - это сложные поликристаллические образования протяженностью от пяти до двадцати микрометров и 1,5 мкм высотой. V-дефект состоит из центральной и периферических областей. Центральная область - это конгломерат наиболее крупных (по сравнению с кристаллитами периферии) и высоких поликристаллов, имеющих форму тетрагональных и гексагональных пирамид, ориентированных в направлении роста и сросшихся боковыми гранями. Периферические области состоят из мелких кристаллитов и переходят в нарушенный слой структуры поверхности, где развиваются дислокации и двойники. Картины дифракции электронов показали, что периферические области V-дефекта имеют одинаковую кристаллическую структуру, но разную ориентацию элементарной ячейки.

Определен относительный элементный состав дефектных и монокристаллических бездефектных областей по поверхности варизонного слоя гетероструктур $Hg_{1-x}Cd_xTe$, где $x=0,34$. Для центра V-дефекта характерно избыточное содержание теллура (около 3%) и недостаточное количество ртути (более 3%) относительно стехиометрии состава варизонного слоя ГЭС КРТ согласно рентгеновскому микроанализу при погрешности измерений 0,1%.

С помощью метода поперечных разрезов в глубину структуры установлено, что зарождение V-дефектов происходит как на границах разделов (подложка/эпитаксиальный слой, буферный слой/эпитаксиальный слой), так и внутри буферных и эпитаксиальных слоев гетероструктур КРТ. Это свидетельствует о двух группах причин образования V-дефектов. Первая группа причин связана с морфологией поверхности и дефектностью структуры подложки. Вторая - обусловлена отклонением условий процесса выращивания эпитаксиальных и буферных слоев от оптимальных.

Определено три типа V-дефектов в зависимости от формы центральной области: 1) шаровидные; 2) протяженные (вытянутые); 3) смешанные, с крупнокристаллической центральной областью и лучеобразными периферическими ответвлениями. Конфигурация центральной области каждого V-дефекта зависит от особенностей микрорельефа и структурных дефектов подложки, адсорбирующих молекулярный Te_2 , а также изгибов макроступеней растущей поверхности при неоптимальных условиях роста буферных и рабочих слоев КРТ. Причина различной формы V-дефектов носит кристаллографический характер. Конфигурация центральной области каждого V-дефекта зависит от особенностей микрорельефа поверхности и взаимодействия винтовых и линейных дефектов, образующих определенный вид дислокационного кластера. Шаровидная центральная область V-дефекта формируется с развитием

дислокационных петель. Вытянутая форма V-дефекта характерна для конгломерата дислокаций с преобладанием краевой составляющей, V-дефект смешанного типа развивается с образованием краевых дислокаций и дислокационных петель, причем зарождение лучеобразной ветви иногда начинается на границе раздела, а образование крупнокристаллического центра - внутри эпитаксиального слоя.

Изучен механизм образования и развития V-дефектов. Установлено, что зарождение V-дефектов связано с преципитатами теллура, закрепляющимися в местах повышенной поверхностной энергии – изгибах, выступах, микронеоднородностях, конгломератах дислокаций и других дефектах, т.е. там, где энергия диссоциации молекул теллура (Te_2) более высокая, чем на атомно-гладкой поверхности. Молекулярный теллур инициирует образование кристаллического теллура и пирамидальных поликристаллов центральной области V-дефекта. Несоответствия параметров решеток кристаллического теллура и теллурида кадмия ртути в процессе МЛЭ роста вызывают большие механические напряжения в эпитаксиальных слоях ГЭС КРТ, что приводит к дальнейшему развитию дислокаций и образованию двойников. Вследствие высоких механических напряжений между поликристаллическим материалом V-дефекта и монокристаллической структурой выращиваемых слоев образуются пустоты

Показано, что развитие V-дефектов всегда связано с развитием дислокационных кластеров.

Для уменьшения плотности V-дефектов при эпитаксиальном выращивании предлагается выбирать подложку высокого кристаллического качества с бездефектной морфологией поверхности, производить расчеты оптимальной температуры эпитаксиального роста с минимальным числом допущений, активизировать диссоциацию молекул теллура во время эпитаксиального выращивания (например, воздействуя лазером на молекулярные пучки Te_2).

В50 Влияние воздействия мощного импульсного лазерного ИК-излучения на электрофизические свойства гетероэпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

Талипов Н.Х.

Военная академия РВСН им. Петра Великого, Москва, Россия

ИК-излучение, широко используется для засветки ИК-фотоприемников на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) в реальных условиях их применения. Поэтому представляет особый интерес исследование влияния лазерного облучения на электрофизические свойства гетероэпитаксиальных слоев КРТ, выращенных методами молекулярно-лучевой и жидкофазной эпитаксии (ГЭС КРТ МЛЭ и ЖФЭ КРТ). В работе представлены результаты исследования электрофизических свойств ГЭС КРТ МЛЭ и ЖФЭ КРТ после воздействия мощного импульсного ИК-излучения твердотельного $\text{YAG}/\text{Nd}^{3+}$ и химического DF лазеров.

Для экспериментов использовались гетероэпитаксиальные слои $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ *n*- и *p*-типа, выращенные методами молекулярно-лучевой эпитаксии в ИФП СО РАН (г. Новосибирск) на подложках GaAs и жидкофазной эпитаксии в ГИРЕДМЕТе (г. Москва) на подложках CdZnTe. Образцы ГЭС КРТ МЛЭ в рабочем слое имели состав $x=0,209-0,220$, а в верхнем варизонном слое – $x_s=0,45-1,0$. В ГЭС КРТ МЛЭ *n*-типа концентрация электронов составляла величину $n=(2-9)\cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$, их подвижность $\mu_n=(0,6-1,0)\cdot 10^5\text{ см}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$, в образцах *p*-типа концентрация дырок имела значение $p=(0,9-1,0)\cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$, их подвижность $\mu_p=570\text{ см}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$. ЖФЭ КРТ имел состав

$x=0,216-0,222$, концентрацию электронов $n=(0,2-1,1)\times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и их подвижность $\mu_n=(0,9-1,1)\cdot 10^5 \text{ см}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ в образцах n -типа, и концентрацию дырок $p=1,4\cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и подвижность $\mu_p=510 \text{ см}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ – в p -типе.

В часть образцов ГЭС КРТ МЛЭ p -типа, имеющих в рабочем слое ступеньку повышенного состава ($x=0,25$), была проведена имплантация ионов бора с энергией 100 кэВ, дозой $3\cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. На поверхность ряда образцов ГЭС КРТ МЛЭ была нанесена пленка Al_2O_3 толщиной 100 нм. Структуры со стороны слоя КРТ были облучены при комнатной температуре мощными одиночными импульсами YAG/Nd^{3+} лазера на длине волны 1,06 мкм и DF лазера, излучающего в интервале длин волн 3,8-4,2 мкм. Длительность импульса YAG/Nd^{3+} лазера составляла 11, 15 и 25 нс, плотность мощности излучения в импульсе – от 1,5 до 20 МВт/см². У DF лазера плотность мощности импульсов варьировалась в интервале 1,35-10,2 МВт/см² при длительности 2 мкс. Облученные структуры исследовались методом дифференциального эффекта Холла при температуре 77 К.

Было установлено, что заметное изменение электрофизических свойств облученных структур ГЭС КРТ МЛЭ и ЖФЭ КРТ начинается при плотности мощности обоих лазеров больше 1,5 МВт/см². В облученных структурах p -типа с ростом интенсивности излучения возрастает концентрация дырок и уменьшается их подвижность (рис.1). Однако характер воздействия более коротковолнового излучения лазера на неодиме существенно отличается от облучения фтор-дейтериевым лазером.

В облученных лазером YAG/Nd^{3+} образцах p -типа увеличение концентрации дырок вплоть до $p=2\cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ происходит только в приповерхностном слое толщиной до 0,8 мкм независимо от мощности, а оставшийся слой ГЭС КРТ МЛЭ и ЖФЭ КРТ сохраняет исходные свойства (рис.2). С ростом интенсивности излучения неодимового лазера наблюдается смещение пространственного распределения увеличенной концентрации дырок вглубь образца. Максимум концентрации дырок лежит на глубине 0,2-0,3 мкм, в слое, где в КРТ полностью поглощается излучение YAG/Nd^{3+} лазера с длиной волны 1,06 мкм. Обнаружено, что у ГЭС КРТ МЛЭ, покрытого пленкой Al_2O_3 облучение YAG/Nd^{3+} лазера повышает концентрацию дырок и глубину модифицированного слоя по сравнению с непокрытым образцом. В имплантированных ионами бора структурах ГЭС КРТ МЛЭ после облучения неодимовым лазером происходит частичный отжиг n^+ -слоя. В образцах ГЭС КРТ МЛЭ и ЖФЭ КРТ n -типа после облучения YAG/Nd^{3+} лазером возрастала проводимость и наблюдалась сильная полевая зависимость коэффициента Холла (который оставался отрицательным), что, по-видимому, связано с образованием поверхностного слоя с дырочной проводимостью.

При облучении DF лазером увеличение концентрации носителей происходит во всей структуре, причем с ростом интенсивности излучения до 7,0 и 10,2 МВт/см² концентрация дырок возрастает вплоть до $p=2\cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в приповерхностном слое толщиной 0,5 мкм и затем падает до $p=(0,6-1,0)\cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, при этом существенно уменьшается подвижность дырок (рис. 3). Интересно отметить, что на глубине ~1 мкм в области максимального поглощения ИК-излучения DF лазера с длиной волны ~4 мкм наблюдается локальный минимум проводимости и подвижности носителей.

Таким образом, исследования электрофизических свойств облученных гетерозпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ показали, что основным типом дефектов, возникающих в результате этого, являются вакансии ртуты, которые играют роль акцепторов в этом материале. Процессы дефектообразования зависят от длины волны лазерного излучения: дефекты, порождаемые импульсами YAG/Nd^{3+} лазера, концентрируются лишь вблизи поверхности, в то время как излучение DF лазера создает дефекты в значительной части слоя эпитаксиальной структуры. Возможно,

последнее обстоятельство связано также с большей длительностью импульса DF лазера, вследствие чего процессы релаксации в кристаллической решетке начинаются через большой промежуток времени.

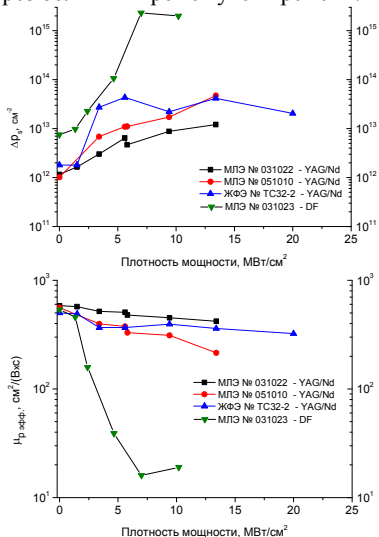


Рис.1. Зависимость изменения слоевой концентрации и эффективной подвижности дырок в ГЭС КРТ МЛЭ и ЖФЭ КРТ p -типа от плотности мощности лазерного излучения.

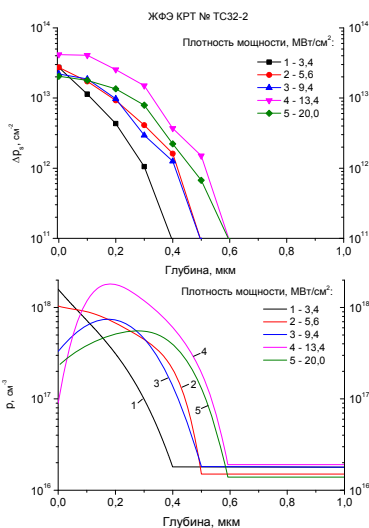


Рис.2. Распределение изменения слоевой концентрации и концентрации дырок по глубине ЖФЭ КРТ p -типа при различной плотности мощности излучения YAG/nd¹³³ лазера.

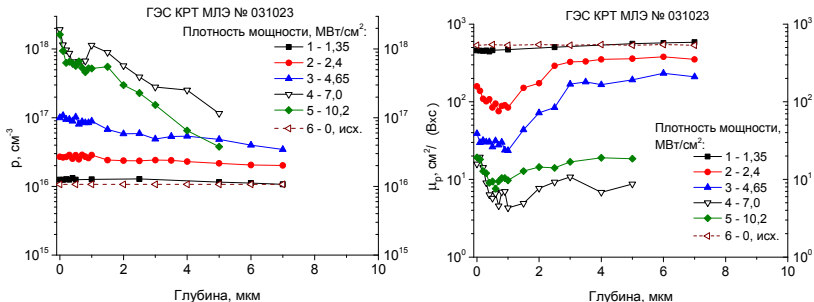


Рис.3. Распределение концентрации (p) и подвижности дырок (μ_p) по глубине ГЭС КРТ МЛЭ p -типа при различной плотности мощности излучения DF лазера.

Б51 Влияние «нарцисс-эффекта» на результаты калибровки стенов для измерения параметров оптико-электронных приборов

Алешко Е.И., Гараева А.И., Курт В.И.

ОАО «НПО Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

При использовании контрольно-проверочной аппаратуры (КПА) для контроля параметров тепловизионных приборов (ТВП) с охлаждаемыми приемниками излучения, а также при их калибровке в величинах разности радиационных температур

(PPT) радиометрами с такими же приемниками, возникает подсветка тест-объекта КПА холодным излучением приемника. Эта подсветка создает дополнительную PPT к устанавливаемой, а также является одной из причин появления PPT на выходе КПА в выключенном состоянии при стыковке его с испытуемым ТВП или радиометром.

Влияние «нарцисс-эффекта» может внести дополнительные погрешности при тестировании ТВП на измерительных стендах и КПА, имеющих в своем составе коллиimator, т.к. при их калибровке с помощью радиометров дополнительная PPT может иметь другое значение, чем при тестировании ТВП и ее нельзя записать в формуляр стенда как смещение нуля.

При разработке измерительных стендов (ИС) для определения характеристик ТВП необходимо исключить возможность возникновения «нарцисс-эффекта», выполняя следующие мероприятия:

- применять обработку и покрытия элементов тест-объекта, при которых их фотометрические характеристики будут приближаться к идеальным (особенно обращать внимание на минимизацию зеркальной составляющей отражения для зеркальных тест-объектов);

- по возможности применять длиннофокусные коллиматоры в составе ИС;

- зеркальные тест-объекты устанавливать под наклоном к оптической оси коллиматора ИС.

В то же время, следует отметить, что явление «нарцисс-эффекта» может играть и положительную роль, например, при разработке КПА для контроля работоспособности и функционирования ТВП. В этом случае можно использовать «нарцисс-эффект», устанавливая зеркальные миры нормально к оси коллиматора и используя в качестве входного окна коллиматора нейтральные ослабители соответствующей плотности. Такая насадка будет работать как световозвращатель в пассивном режиме (без электропитания).

Б52 Термодиоды с барьером Шоттки для неохлаждаемых микроболометрических приемников излучения

Юрьев В.А., Чапнин В.А., Чиж К.В., Резник В.Я., Корольков В.П., ¹Рудаков Г.А.

Институт общей физики им.А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

¹ НПК «Технологический центр», Зеленоград, Москва, Россия

Изучены электрофизические и структурные свойства диодов Шоттки, сформированных на слоях поликристаллического Si<P>, с целью их использования в качестве термочувствительных элементов при создании монолитных неохлаждаемых микроболометрических ИК фотоприемных матриц для диапазона длин волн от 2 до 14 мкм [1]. Достоинствами таких структур является возможность встраивания технологического процесса их формирования в стандартную кремниевую МОП-технологии, возможность каскадного включения диодов Шоттки для повышения температурной чувствительности болометрических элементов матрицы, использование слоев диодных структур в качестве поглощающих покрытий болометрических ячеек.

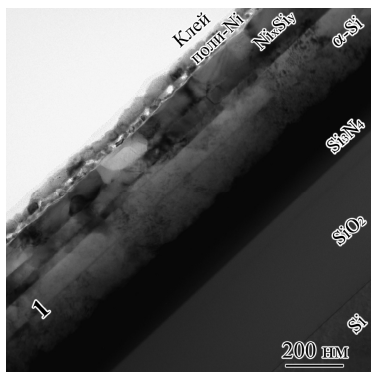


Рис. 1. ПЭМ-изображение структуры с барьером Шоттки NiSi/поли-Si

последующей термической обработкой в вакууме при температуре 600°C в течение 30 мин. При такой термообработке также происходит активация имплантированного фосфора. Тестовые элементы, на которых проводились измерения, формировались методами контактной литографии. Проведены измерения ВАХ, температурной зависимости напряжения диодов Шоттки. Методами ПЭМ исследованы структурное совершенство и химический состав поликристаллического кремния, силицида никеля и границы раздела NiSi/поли-Si. На рис. 1 представлено ПЭМ-изображение термочувствительной структуры на основе диода Шоттки NiSi/поли-Si. Анализ изображения подтверждает образование силицида никеля на поверхности кремния, аморфизированного в процессе имплантации фосфора, и хотя в слое силицида никеля наблюдается образование поликристаллической фазы, граница NiSi/поли-Si четкая.

Разработана лабораторная технология получения мембран для элементов болометрических матриц (рис. 2). Ячейки выполнялись по схеме «мембрана над колодцем». Структуры формировались селективным травлением Si(001). Стенки колодца образованы гранями {011}. На РЭМ-изображениях структур помимо болометрических элементов видны металлические токопроводящие дорожки.

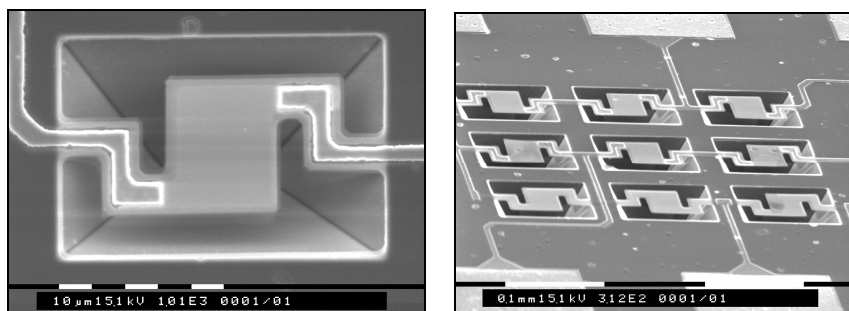


Рис. 2. РЭМ-изображения болометрических ячеек, выполненных по схеме «мембрана над колодцем». Структуры получены травлением Si(001), «стенки» колодца образованы гранями {011}

Исследования температурных зависимостей вольтамперных характеристик показали, что ВАХ структур с низким удельным сопротивлением поли-Si ($\rho_s \sim 370$ Ом/кв.) имели диодный вид (рис. 3). Температурный коэффициент напряжения структур вблизи 300 К менялся в пределах 0,4-0,6 %/°C.

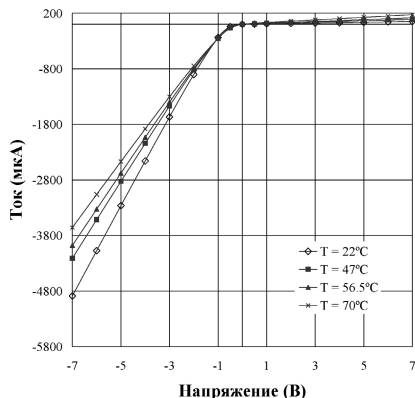


Рис. 3. ВАХ структуры с барьером Шоттки NiSi/поли-Si

1. В. А. Юрьев, В. А. Чапнин, Л. В. Арапкина, К. В. Чиж. Патент РФ № 74741 от 03.04.2008 г.

Б53 Исследование эмиссионной неоднородности диодов Шоттки АСМ методом

Еганех М.А., Асланова А.Р.

Бакинский государственный университет, Азербайджан

Реальные диоды Шоттки (ДШ) обычно изготавливаются путем нанесения металлических тонких пленок на поверхности высоко полированных и химически очищенной поверхности полупроводника с определенной кристаллической ориентацией. При этом, в основном из-за поликристаллической структуры металлической пленки, содержащей разноориентированных мелких кристаллитов, границы раздела ДШ становятся эмиссионной неоднородной, вдоль которой локальная высота потенциального барьера меняется в пределах до 1 эВ [1].

В данной работе представлены результаты исследования структурной неоднородности пленки никеля и особенности токопрохождения в наночастках Ni-nSi ДШ с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). Топология и токовое АСМ изображение явно свидетельствуют о неоднородности металлической пленки. Были измерены вольтамперные характеристики многочисленных наночастков ДШ. Прямые ветви нано-ДШ в широком интервале тока около 7-8 порядок хорошо изображаются прямыми линиями в полулогарифмическом масштабе. Интересно отметить, что и обратные ветви ВАХ нано-ДШ также хорошо изображаются прямыми линиями в полулогарифмическом масштабе в интервале тока около 5-6 порядок. При этом обнаружено следующая корреляция между коэффициентом идеальности (n) прямой ветви ВАХ и безразмерным коэффициентом (n_r) обратной ветви ВАХ нано-ДШ:

$$\frac{1}{n} + \frac{1}{n_r} = 1 \quad (1)$$

В таблице 1 представлены значения таких электрофизических параметров 5 нано-ДШ, как токи насыщения в прямом направлении и соответствующие высоты

потенциального барьера (Φ_{BF}), коэффициент идеальности (n), коэффициент пропорциональности изменения высоты барьера в зависимости от напряжения (β), численное значение коэффициента идеальности (n_c), которое вычислено по формуле (1), возрастание высоты потенциального барьера при приложении прямого напряжения на 0,7 В. Как видно из таблицы, между параметрами n и n_c существует хорошее совпадение. Это означает, что изменение высоты потенциального барьера нано-ДШ в прямом и обратном направлениях (в области сильного роста тока) имеет одинаковый характер.

Таблица 1

Диоды №	Прямое направление ($U > 0$)					
	I_{OF} (А)	Φ_B (эВ)	n	β	n_c	$\beta q U$ (0.7V) эВ
1	1.3E-19	0.830	1.07	0.10	1.08	0.070
2	6.0E-19	0.848	1.07	0.11	1.08	0.077
3	2.4E-18	0.830	1.07	0.10	1.07	0.070
4	5.4E-18	0.852	1.06	0.08	1.07	0.056
5	3.25E-15	0.852	1.05	0.08	1.07	0.056

Полученные результаты свидетельствуют о том, что реальные ДШ состоят из параллельно соединенных и взаимодействующих микроконтактов с различными электрофизическими параметрами и особенно, различными высотами потенциальных барьеров на границе раздела. При этом электрически взаимодействие наночастиц приводит к возникновению дополнительного электрического поля в реальных ДШ и следовательно, в них образуются действующие высоты потенциальных барьеров. Плоские ДШ, которые состоят из совокупности параллельно соединенных и электрически взаимодействующих микро- и наноконтактов, характеризуются определенной действующей высотой потенциального барьера.

1. Мамедов Р.К., Контакты металл-полупроводник с электрическим полем ятепн, Баку, БГУ, 2003, 231 с.

В54 Непосредственное измерение дополнительного электрического поля в реальных диодах Шоттки

Мамедов Р.К.

Бакинский государственный университет, Азербайджан

Известно [1] что, при непосредственном контакте металла с полупроводником возникают контактные разности потенциалов как между контактирующими поверхностями металла и полупроводника, имеющими работу выхода порядка 4-5 эВ, так и между контактной поверхностью границы раздела, имеющей высоту потенциального барьера порядка 1 эВ и к ней примыкающими свободными поверхностями металла и полупроводника, имеющими работу выхода порядка 4-5 эВ. Основное электрическое поле, возникающие из-за контактной разности потенциалов между контактирующими поверхностями металла и полупроводника, охватывает всю приконтактную область полупроводника. А дополнительное электрическое поле (ДЭП), возникающее из-за контактной разности потенциалов между контактной поверхности границы раздела и к ней примыкающими свободными поверхностями металла и полупроводника, охватывает периферийную приконтактную область полупроводника.

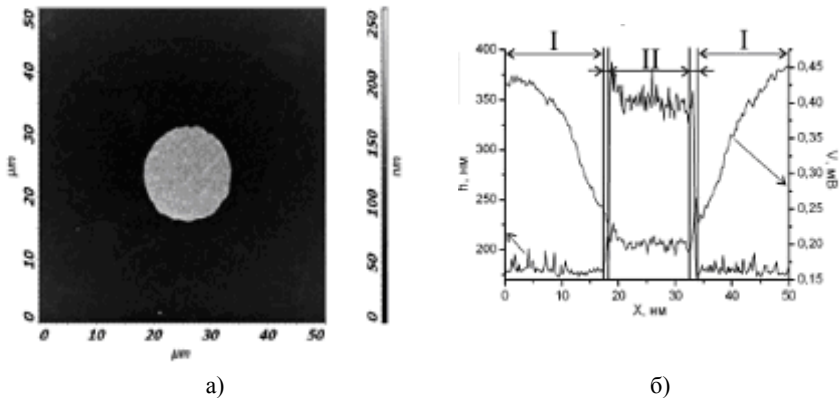


Рис. 1

На Рис. 1 представлены АСМ изображения рельефа (а) золотого контакта с диаметром 15 мкм на участке 50x50 мкм² поверхности GaAs, и также поперечного сечения (б) рельефа вдоль диаметра контакта и распределения контактной разности потенциалов (КРП) между контилевром (зондом) и поверхностью полупроводника и металла. Видно, что под действием дополнительного электрического поля вокруг металла образуется переходная область с шириной около 15 мкм, где потенциал меняется от значения поверхностного потенциала металла до значения поверхностного потенциала полупроводника.

Для изучения влияния ДЭП на характер токопрохождения изучено ВАХ Au-nGaAs диода Шоттки с контактной поверхностью шириной около 1 мкм. В нормальных плоских ДШ коэффициент идеальности (n) имеет значение порядка 1,01-1,02 и максимум потенциального барьера от контактной поверхности металла ДШ находится на расстоянии около $x_{ma} \approx 1-2$ нм в области пространственных зарядов с глубиной d_0 . Коэффициент идеальности (n_f) узких ДШ имеет значение порядка 1,10. Это означает, что расстояние x_{ma} от контактной поверхности металла узкого ДШ становится больше, чем того же расстояния для плоского ДШ, т.е. $x_{ma} > x_m$. Энергетическая диаграмма узкого ДШ на основе полупроводника с электронной проводимостью при отсутствии внешнего напряжения ($U=0$) изображается немного искаженной. При этом высота барьера Φ_{BA} узкого ДШ образуется под действием суперпозиции дополнительного электрического поля и поля области пространственных зарядов с глубиной l_0 , если $l_0 > d_0$. Потенциальный барьер узкого ДШ содержится суммы из локального потенциала Φ_{BO} на контактной поверхности металла и потенциала $\Delta\Phi_{BO}$, обусловленная ДЭП на расстоянии x_{ma} :

$$\Phi_{BA} = \Phi_{BO} + \Delta\Phi_{BO}$$

При приложении напряжения U к ДШ в обратном направлении (отрицательный потенциал к металлу) напряженности внешнего электрического поля и дополнительного электрического поля в приконтактной области полупроводника направляются противоположно. Тогда, как следует из линейности ВАХ в полулогарифмическом масштабе, высота барьера ДШ линейно уменьшается с ростом U начиная от 0, если $l_0 \leq d_0$, и высота барьера определяется формулой:

$$\Phi_B = \Phi_{BA} - q\beta_f U = \Phi_{BO} + \Delta\Phi_{BO} - q\beta_f U$$

В55 Управление электрическим полем параметрами и характеристиками фотоприемников на основе слоистых кристаллов $A^{III}B^{VI}$

Абдинов А.Ш., ¹Бабаева Р.Ф., Амирова С.И., Рзаев Р.М., ²Гасанов Я.Г.

Бакинский государственный университет, Азербайджан

¹ *Азербайджанский государственный экономический университет, Баку, Азербайджан*

² *Азербайджанский медицинский университет, Баку, Азербайджан*

Монокристаллы моноселенидов индия и галлия (InSe и GaSe), которые являются характерными представителями класса полупроводниковых соединений $A^{III}B^{VI}$ со слоистой структурой с первого дня своих открытий привлекают внимание исследователей и специалистов различного профиля (физиков, инженеров и конструкторов) как высокотемпературные (вплоть до 350 К) фотопроводники в области видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазона оптического спектра.

Обладание высокой фоточувствительностью монокристаллов n -InSe ($0,40 \leq \lambda \leq 1,35$ мкм) в области солнечного излучения с большой интенсивностью падающей на Земную поверхность энергии и достаточна высокая степень совпадения спектра фоточувствительности ($0,30 \leq \lambda \leq 0,70$ мкм), а также спектра основной полосы электролюминесценции ($0,50 \leq \lambda \leq 0,65$ мкм) кристаллов p -GaSe со спектром (функцией) зрения человеческого глаза ($0,35 \leq \lambda \leq 0,78$ мкм), особенно почти точное их совпадение ($\lambda \approx 0,555$ мкм), побуждает значительный интерес к этим материалам для создания на их основе фотопреобразователей солнечной энергии в электрическую с высокой эффективностью, а также приемников и источников света с высокой чувствительностью для оптоэлектроники.

Известно, что для вышеуказанных приборов и устройств (солнечных преобразователей, фотоприемников, электролюминесцентных источников света) определяющее значение имеет спектральное распределение, световая (люкс-амперная) характеристика, кинетика, температурная зависимость фоточувствительности, а также возможности стабилизации и управления этих характеристик используемого в качестве рабочего вещества полупроводникового материала.

В ранних работах различными авторами, в том числе нами показаны возможности создания высокочувствительных фотоприемников для видимой и ближней ИК области оптического спектра на основе слоистых кристаллов $A^{III}B^{VI}$, в частности кристаллов моноселенида индия и галлия (n -InSe и p -GaSe). При этом выявлены некоторые технологические способы и выяснены механизмы стабилизации для основных физических параметров и характеристик этих материалов.

В данной работе сообщается о результатах, полученных нами при экспериментальном изучении возможностей управления внешним электрическим полем параметрами и характеристиками фотоприемников видимого и ближнего ИК диапазона оптического спектра на основе слоистых кристаллов $A^{III}B^{VI}$ (на основе кристаллов n -InSe и p -GaSe). В результате проведенных экспериментальных исследований в широком диапазоне изменения интенсивности и длины волны света, температуры, напряженности электрического поля и уровня легирования атомами различных редкоземельных элементов (гольмия, гадолиния, диспрозия) установлено, что при воздействии на эти кристаллы внешнего электрического поля, большего

некоторого граничного (напряженность граничного поля, отличного для различных образцов отличается в зависимости от исходного темнового удельного сопротивления, температуры и уровня легирования), в их спектрах фотопроводимости появляются новые, индуцированные инъекцией положительные и отрицательные полосы, за счет которых область fotocувствительности фотоприемников на основе этих полупроводников может значительно (от $0,35 \div 1,25$ мкм почти до $0,30 \div 3,00$ мкм) расширяться.

В результате проведенных экспериментальных измерений показано, что в зависимости от величины приложенного к изучаемому образцу внешнего электрического напряжения существенно меняется также скорость релаксации fotocувствительности указанных полупроводниковых материалов (кристаллов n -InSe и p -GaSe) при включении и выключении света и соответственно, инерционность фотоприемников созданных на их основе.

Исследована также зависимость влияния приложенного к исследуемому образцу внешнего электрического поля на отдельные параметры и характеристики созданных на основе слоистых кристаллов моноселенида индия и галлия фотоприемников от различных внешних и внутрикристаллических факторов (от температуры, интенсивности падающего на образец света, уровня легирования атомами редкоземельных элементов типа гадолиния, гольмия и диспрозия, величины исходного темнового удельного сопротивления образца).

Путем сравнительного анализа полученных экспериментальных результатов и учета существующих в научной литературе информации об электронных свойствах исследованных материалов выяснены механизмы выявленных при проведенных измерений особенностей фотопроводимости слоистых кристаллов $A^{III}B^{VI}$. Кроме того, показаны возможности применения этих полупроводников для создания на их основе фотоприемников для видимой и ближней ИК области спектра с управляемыми электрическим полем параметрами и характеристиками.

Б56 Электрические свойства контактов $Pb_{1-x}Mn_xTe$ - металл

Алиева Т.Д., Абдинова Г.Д., Ахундова Н.М., Абдинов Д.Ш.

Институт физики НАНА, Баку, Азербайджан

Сплавы $Pb_{1-x}Mn_xTe$ являются узкощелевыми полумагнитными полупроводниками и в их монокристаллах наблюдается ряд интересных фотоэлектрических, осцилляционных и фотолюминесцентных явлений. В качестве контактного материала для этих твердых растворов часто используется сплав мас. %: $95In+4Ag+1Au$. Контакт металл-полупроводник является неотъемлемой частью полупроводникового преобразователя и его основные характеристики определяются и электрическими свойствами этого контакта. Однако свойства границ раздела монокристаллов $Pb_{1-x}Mn_xTe$ с металлами исследованы недостаточно, несмотря на их большую практическую значимость.

В данной работе исследованы вольт-амперные характеристики и сопротивления границ раздела монокристаллов $Pb_{1-x}Mn_xTe$ ($0 \leq x \leq 0,04$) со сплавом мас. % : $95In+4Ag+1Au$ в интервале температур $77-300$.

Монокристаллы были выращены методом Бриджмена из особо чистых элементов, взятых в стехиометрическом соотношении. Монокристаллы с $x=0$; $0,0025$; $0,005$ и $0,02$ обладали p -типом, а с $x=0,04$ – n -типом проводимостью. Удельные

сопротивления кристаллов в зависимости от x изменялись в пределах $1,5 \cdot 10^{-2}$ - $2,5 \cdot 10^{-4}$ Ом·см.

Выяснено, что контакты во всех случаях являются омическими и с ростом x контактное сопротивление r_k существенно падает (от $1,7 \cdot 10^{-2}$ Ом·см² для образцов с $x=0$ до $8,7 \cdot 10^{-4}$ Ом·см² с $x=0,04$ при ~ 77 К). При этом наблюдается хорошая корреляция между зависимостями r_k и удельными сопротивлениями кристаллов от концентрации Mn в твердом растворе. С ростом температуры r_k для образцов на основе монокристаллов с $x=0; 0,0025; 0,005$ и $0,02$ медленно падает, а для образцов с $x=0,04$ – растет. Показано, что в структурах на основе кристаллов с p -типом проводимости основным механизмом протекания тока в контакте является термополевая эмиссия, а в контакте структур на основе n - типа кристаллов - по металлическим шунтам.

Б57 Температурная зависимость контактного сопротивления омического контакта (Bi-Sn)/Bi_{0,7}Sb_{1,3}Te_{2,93}Se_{0,07}

Бархалов Б.Ш., Алиева Т.Д., Ахундова Н.М., Алиев Р.Ю., Магеррамова К.И

Институт Физики НАНА, Баку, Азербайджан

Твердые растворы на основе теллуридов висмута и сурьмы являются основным материалом для термоэлектрических охладителей, предназначенных для работы в области средних температур. Эффективность термоэлементов, изготовленных на основе указанных материалов наряду с параметрами самого термоэлектрического материала существенно зависит также от сопротивления границы раздела контактного сплава с термоэлектрическим материалом – переходного контактного сопротивления R_k . Оптимизация параметров термоэлектрических материалов, так и контактов к ним наряду с варьированием состава и количества примесей, может быть проведена также и оптимизацией технологических процессов, одним из которых является отжиг.

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты, полученные при изучении механизма протекания тока в сплавном омическом контакте (Bi-Sn)/Bi_{0,7}Sb_{1,3}Te_{2,93}Se_{0,07}.

Показано, что как для не прошедших отжиг, так и отожженных при ~ 500 К образцов контактное сопротивление, приведенное к единице площади R_k в интервале температур 80-300 К возрастает, что противоречит основным теориям протекания тока в омическом контакте – термоэлектронной, термополевой и полевой эмиссии, согласно которым контактное сопротивление должна либо уменьшаться с ростом температуры, либо оставаться постоянной.

Так как возрастание контактного сопротивления с ростом температуры характерно для металлов, предполагается, что образование омического контакта связано с металлическими шунтами, представляющими собой атомы металла, осажденные по линиям несовершенств, например, дислокаций, и закорачивающие слой объемного заряда.

Ранее нами было показано, что при нанесении контактного сплава Bi-Sn на поверхность кристаллов систем Bi-Sb-Te-Se происходит растворение полупроводника в контактном сплаве и вследствие реактивной диффузии образуются промежуточные фазы в виде теллуридов и селенидов компонентов этого сплава. Поэтому можно предположить, что шунты образуются из таких промежуточных фаз. С термообработкой структур шунты с металлическим характером проводимости совершенствуются, что приводит к уменьшению значений контактного сопротивления R_k .

Таким образом, можно считать, что основным механизмом протекания тока в омическом контакте (мас. %: 57Bi+43Sn)/Bi_{0,7}Sb_{1,3}Te_{2,93}Se_{0,07} является протекание тока по металлическим шунтам из образовавшихся промежуточных фаз с металлической проводимостью.

Б58 Сравнительный анализ отечественной и зарубежной нормативной документации, регламентирующей водоподготовку и стандарты качества в производстве микроэлектроники и ФПУ

Азрапкин А.П.

ФГУП «НПО «Орион», Москва, Россия

В микроэлектронной промышленности, при производстве, требующей высоко очищенную воду для предотвращения загрязнения продуктов, так как загрязнения могут послужить причиной недопустимого низкого выхода электронной продукции, важнейшую роль играет руководство нормативной документацией. Для сравнения примем отечественный отраслевой стандарт ОСТ 11.029.003-80 и аналогичные стандарты европейских стран. При сравнении пределов содержания загрязнений в высшей категории воды можно отметить более строгие пороговые значения содержания веществ в стандарте ASTM. Так же при анализе допустимых материалов в списке отечественного отраслевого стандарта отмечена сталь, что является загрязняющим веществом для такой высокой марки воды. В стандарте ASTM без альтернативы обозначен только материал PVDF, что отлично подходит для исполнения транспортировки и задачи ультра чистой воды. При анализе технологических схем, рекомендованных к реализации в отраслевом стандарте можно отметить немало грубых нарушений, которые помешают получить воду требуемого качества. Приведу лишь несколько из них. В п. 4.3.3 стр. 14 рекомендуется в качестве финишной очистки использовать микрофильтр с рейтингом очистки 0,2 микрона. На этом фильтре по рекомендации стандарта, производится задержание и удаление микробиологического и субмикронного загрязнения. Однако если учесть, что размер вирусных организмов и загрязняющих коллоидов примерно находится в пределах 0,1 микрон и ниже, то микрофильтр ни только не будет справляться со своей функцией, но и будет служить источником загрязнения, находясь в линии очистки на финишной стадии. Решение этой проблемы довольно простое - обратноосмотические системы. Рейтинг очищающей мембраны позволяет удалять все вирусные организмы и рейтингом до 0,0001 микрон. Еще необходимо отметить о таком совете стандарта как подача воды марки А в накопительные емкости снизу. В современных системах это решение требует сложной системы дыхания емкости организации азотной подушки. Более простое и практичное решение, применяемое в проектных организациях - это заложение душирующего устройства. Душирующее устройство распределяет поток воды по стенкам накопительной емкости предотвращая ее микробиологическое обрастание. Так же необходимо отметить такую рекомендацию стандарта - как предусмотрение защиты от клино-ременной передачи обратноосмотического аппарата «Осмос-5». В современных системах обратного осмоса такая мера будет казаться странной. Потому что многие системы вообще не требуют участия человека в технологическом процессе. Необходимо отметить такое замечание стандарта, как замена механических фильтров (они отмечены как фильтры предварительной очистки) по перепаду давления на них в 2,5 бар. Это довольно большой перепад давления, при котором фильтры будут являться

источником микробиологического загрязнения. Этого явления контаминации можно избежать, если совершать замену фильтров по перепаду давления не более 1 бара.

В заключении необходимо отметить, что проектные организации, к радости заказчиков стараются использовать передовые технологии отечественных, европейских и восточных инженеров. К таким организациям международного уровня относится и компания ЗАО "НПК Медиана- фильтр". На счету у компании не одна сотня успешно реализованных проектов в области водоподготовки и водоотведения.

Конкретно в области микроэлектроники можно отметить такие известные организации, которые воспользовались услугами компании:

НИИ Космического приборостроения.

ОАО «Протон», г. Орел.

ОАО «Экситон» г. Электросталь

НИИ Радиосвязи, г. Ростов.

ОАО «Мосэлектронпроект»

ОАО «Пульсар»

ФГУП «НПП «Исток»

Ижевский радиозавод.

Завод «Микрон».

Б59 Электронно-оптический преобразователь на спектральный диапазон 950-1650 нм с фотокатодом на основе барьера Шоттки.

Балаянский Л.М.¹, Гордиенко Ю.Н.¹, Ваценко П.Л.¹, Дятлов А.Л.¹, Чистов О.В.¹,
Варфоломеев А.Ю.¹, Широков Д.А.¹, Мармалюк А.А.², Рябоштан Ю.А.²

¹ *ОАО НПО «Геофизика-НВ» Россия Москва.*

² *ФГУП «НИИ «Полюс» Россия Москва*

Спектральный диапазон 1000-2000 нм является перспективным для приборов ночного видения. В настоящее время наилучшего результата по созданию электронно-оптического преобразователя в этом диапазоне длин волн достигнут фирмой Intevac, которая разработала фотоэлектрический модуль с фотокатодом на основе барьера Шоттки со встроенной в вакуумный объем матрицей ПЗС. Достигнут квантовый выход фотокатода 10-25 % при темновом токе порядка 10^{-7} - 10^{-6} А. Большая величина темнового тока предопределяет работу модуля только совместно с лазерной подсветкой в активно-импульсном режиме.

Конструктивно фотокатод прибора фирмы Intevac изготовлен на подложке InP толщиной 200-300 мкм, которая механически крепится к входному окну вакуумного усилителя. Такая конструкция обладает рядом недостатков, в т.ч. значительная доля потока излучения поглощается в подложке и не дает фотовозбужденных носителей, что снижает эффективность фотокатода. Прочность такой конструкции к воздействию механических факторов также проблематична.

Нами разработан фотоприемный модуль с фотокатодом с барьером Шоттки. Для изготовления фотокатодного узла модуля в НИИ «Полюс» разработана инверсная гетероэпитаксиальная структура, состав которой показан в таблице 1.

Таблица 1.

Назначение слоя	Состав
Подложка	InP
Стопорный слой	InGaAs

Назначение слоя	Состав
Эмиттерный слой	InP
Поглощающий слой	InGaAs
Буферный слой	InP

Такая структура обеспечивает изготовление фотокатодного узла по серийной технологии ЭОП 3-его поколения методом компрессионного соединения со стеклом входного окна вакуумного блока.

Конструкция фотокатодного узла вакуумного блока фотоприемного модуля со сравненными технологическими слоями показана на рисунке 1. Она совпадает с конструкцией фотокатодного узла вакуумного блока ЭОП 3-его поколения. Это обеспечивает унификацию конструкции и технологии вакуумного блока в целом и возможность использования технологической линии по выпуску ЭОП 3-его поколения для изготовления ЭОП с барьером Шоттки.

Изготовлены вакуумные блоки с такими фотокатодами. Достигнут квантовый выход 1-2% на $\lambda=1,55$ мкм. Типичная спектральная характеристика фотокатода вакуумного блока показана на рисунке 2.

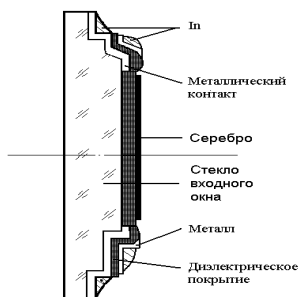


Рис. 1 Конструкция фотокатодного узла вакуумного блока фотоприемного модуля

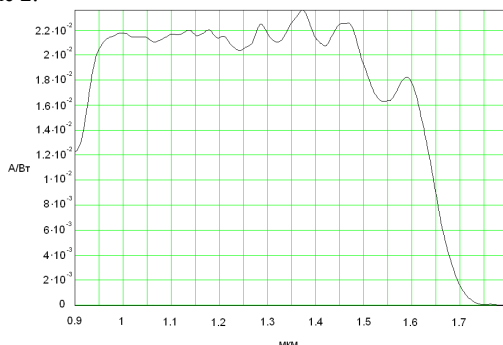


Рис. 2 Спектральная характеристика фотокатода.

Б60 Обзор направлений использования УФ фотоэмиссионных приемников излучения на основе разработанного GaN фотокатода.

Балясный Л.М.¹, Чистов О.В.¹, Широков Д.А.¹, Мармалюк А.А.², Мазалов А.В.²

¹ОАО «НПО «Геофизика-НВ» Россия Москва,

²ФГУП НИИ «Полюс» Россия Москва.

УФ фотоприемники получили широкое распространение в различных отраслях науки и техники, в том числе для решения задач обороны страны.

Основной интерес у потребителей УФ детекторов вызывает так называемый солнечно-слепой диапазон до 300 нм. Эти детекторы, разрабатываемые для данной области спектра, работают практически в отсутствии фонового излучения, так как на поверхности Земли такое излучение отсутствует из-за поглощения озоном в верхних слоях атмосферы. Поэтому их можно использовать в военной области для обнаружения атакующих ракет типа «земля-воздух». Из-за многочисленных террористических актов

последних лет как в нашей стране, так и за рубежом активизировались работы по созданию УФ пеленгаторов кругового обзора на базе ЭОП или ФЭУ с координатно-чувствительными детекторами.

Кроме того, актуальной является задача обнаружения утечек электрического тока в трансформаторах и высоковольтных линиях электропередачи, что в условиях нашей страны позволит сэкономить тысячи киловатт электроэнергии. При этом обследование можно проводить при ярком солнечном свете с вертолета, правда при условии хорошей фильтрации солнечного излучения.

Также, при исследовании далеких звездных образований (галактик, квазаров и т.п.) с помощью мощных телескопов, одним из основных методов является наблюдение УФ излучения звезд в режиме счета фотонов.

Довольно давно в криминалистике и медицине нашло применение УФ фотографирование в отраженном свете, а также люминесценция под действием УФ излучения.

Давно замечено УФ свечение воздуха под действием ионизирующих излучений радиоактивных веществ. Обнаружение полей радиоактивности с помощью УФ фотоприемников также является актуальной проблемой.

Все эти и многие другие исследования невозможно было бы проводить, если бы как у нас в стране, так и за рубежом не разрабатывались различные приемники УФ излучения (ЭОП, ФЭУ, КМОП и ПЗС-матрицы и т.п.).

Основными параметрами этих приемников, определяющими их использование в описанных выше устройствах, являются спектральная чувствительность, пространственное разрешение, степень «солнечной слепоты», то есть отношение спектральной чувствительности на длине волны 250 нм (середина солнечно-слепого диапазона) к чувствительности на длине волны 550 нм (середина видимого диапазона), а также величина темнового тока и уровень собственных шумов, определяющие возможность работы приемника в режиме счета фотонов.

По этим параметрам до сегодняшнего дня непревзойденными являются вакуумные фотоэлектронные приборы – ФЭУ и ЭОП.

До настоящего времени в качестве фотокатодов в таких приборах использовались классические фотокатоды: Cs-O-Ag, Cs₂Te, Rb₂Te, KNaSb, Na₂KCsSb и др. Недостатками классических фотокатодов являются относительно низкая чувствительность в «солнечно-слепом» диапазоне спектра (до 20%) у так называемых солнечно-слепых фотокатодов (Cs₂Te, Rb₂Te) и большой хвост в видимую и ИК область спектра у остальных.

Последние 5-7 лет, одновременно с США и Японии, в России в ФТИ им. А.Ф.Иоффе и ФГУП «НИИ «Полюс» проводятся исследования по созданию гетероэпитаксиальных наноструктур, необходимых для создания ОЭС-фотокатодов на основе нитридов галлия – алюминия.

В ходе ряда НИОКР, проведенных ОАО «НПО «Геофизика-НВ» совместно с НИИ «Полюс» и ИФП СО РАН был разработан ОЭС-фотокатод на основе GaN/AlN на сапфире, ЭОП и фотоприемный модуль (ФПМ) на базе цифровой ПЗС-камеры, состыкованной с ЭОП через волоконную оптику.

В таблице 1 приведены параметры ЭОП и ФПМ на базе классических фотокатодов.

Таблица 1

№ п.п.	Тип ЭОП или ФПМ, фирма-изготовитель	Тип фотокатода, диапазон чувствительности, нм	Чувствительность, S_{λ} на длине волны 260 нм, мА/Вт	Степень «солнечной слепоты» ($S_{\lambda 250}/S_{\lambda 550}$)
1	ЭОП V 4435P-03, Hamamatsu, Япония	Cs ₂ Te, (160-230)	30	10 ⁴
2	ЭОП XX1450 TJ, Photonis-DEP, Франция	Cs ₂ Te, (160-230)	30	2·10 ³
3	ФПМ-5-2-Ф, ОАО «НПО Геофизика-НВ», Россия	GaN/AlN/Al ₂ O ₃	55	>10 ³

Б61 Гетероэпитаксиальная структура на основе AlGaN для солнечно слепых фотоприемников.

Балясный Л.М.¹, Ильевский Д.В.¹, Мармалюк А.А.², Сабитов Д.Р.²

¹ ОАО «НПО «Геофизика-НВ» Россия Москва.

² ФГУП «НИИ «Полюс» Россия Москва

Широкозонные полупроводниковые A₃B₅ гетероструктуры на основе твердых растворов GaN и AlN перспективны для полупрозрачных фотокатодов с отрицательным электронным средством, чувствительных в диапазоне 270-280 нм и «слепых» в видимом диапазоне длин волн.

Гетероструктура создается на установке МОС-гидридной эпитаксии AIXTRON-2400G3 с горизонтальным реактором планетарного типа. На сапфировой подложке диаметром 2" толщиной 430 нм с двухсторонней полировкой и ориентацией (0001) последовательно выращиваются буферный, активный и эмитирующий слои фотокатода.

Буферный слой AlN обеспечивает возможность согласования атомных решеток подложки и активного фоточувствительного слоя. Твердый раствор Al_xGa_{1-x}N с концентрацией ($x \approx 0,42$) AlN в активном слое полупрозрачного фотокатода обеспечивает максимально полное поглощение регистрируемого излучения в УФ диапазоне и максимально высокую вероятность эмиссии электронов в вакуум. В Mg легированном эмитирующем слое p-GaN поверхность, активированная цезием и кислородом, создает состояние отрицательного электронного средства, что позволяет увеличить чувствительность фотокатода.

Перед использованием в качестве фотокатодов полученные гетероструктуры проходят входной контроль по следующим характеристикам в т.ч.:

На электронном микроскопе контролируются толщина и изгиб эпитаксиальных слоев, проверяются их кристаллическое совершенство, а также наличие дислокаций.

На рентгеновском дифрактометре определяется профиль концентрации носителей заряда и энергии межзонный переходов.

Концентрация носителей заряда в эмитирующем слое p-GaN определяется путем измерения ЭДС в магнитном поле согласно эффекту Холла.

Прогнозирование возможной деградации гетероэпитаксиальной структуры при высокотемпературной операции активирования фотокатода определяется по спектральной зависимости фототока в электролит.

Спектральная ватт-амперная характеристика чувствительности фотокатода в УФ диапазоне определяется в отпаянном приборе.

На основе сопоставления чувствительности фотокатода и гетероэпитаксиальной структуры вырабатываются рекомендации для направленного поиска ее оптимальной конструкции, обеспечивающей высокую квантовую эффективность до 50% в УФ диапазоне длин волн.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- A. Satou У09
B.G. Salamov Б07, Б12
Baris Kinaci Б43
Carl Asplund П03
Christen J. Б18
David Billon-Lanfrey П02
Dobos L. У18
Emre Piskin Б44
F. Dagdelen Б12
Franke A. Б18
G. Lecarpentier У01
G. Ribette У01
Guenael Ribette П05
Gurkan Kurtulus Б44
H. Ibrahim Efkerе Б44
Henk Martijn П03
Jinpeng Ma У70
K. Aktas Б12
Kursad Kizilkaya Б43
M. Ryzhii У08, У09
M.S. Shur У08
N. Ryabova У08
N.N. Lebedeva Б07
Pecz B. У18
S. Acar Б12
S. Ozturk Б07
S. Sebnem Cetin Б43, Б44
S.O. Yurchenko У08
Sergiy Smuk П03
Suleyman Ozcelik Б43, Б44
T. Otsuji У08, У09
Tarik Asar Б43, Б44
Tofig Memmedli Б43, Б44
V. Mitin У09
V. Ryzhii У08, У09
V.I. Orbukh Б07
Yunus Ozen Б43
Zhaomin Guo У70
Zhiheng Zhang У70
Абдинов А.Ш. Б55
Абдинов Д.Ш. Б56
Абдинова Г.Д. Б56
Азрапкин А.П. Б58
Айнбунд М.Р. П07
Акимов А.Н. У24, А33, А34
Акимов В.М. А07, А08, А09, А10, Б47
Акимова Н.М. А56
Аксиментьева Е.И. А41
Александров В.А. У10, У11
Александров И.А. У18
Алешко Е.И. У61 Б51
Алиев А.А. Б13
Алиев В.Ш. У05
Алиев Р.Ю. Б57
Алиева Т.Д. Б56, Б57
Алленов М.И. У55, У56
Альмов О.В. П07
Амиров И.И. Б24
Амирова С.И. Б55
Анастасьевская В.Н. У49
Андреев Д.С. А02 Б42
Андреев И.А.. У63, У65
Анисимова Н.П. А12
Антонов А.В. У71
Антонов В.А. Б28
Апатская М.В. А46
Аржанников А.В. П11
Арзамасов Д.И. У45
Артамонов А.В. А51
Артюхов А.В. У56
Арутюнов В.А. П07
Асадов М.М. Б05 Б06
Асач А.В. У27
Асеев А.Л. П09 У01
Асланова А.Р. Б53
Астахов В.П. А51
Ахмедзаде Н.Д. Б01
Ахундова Н.М. Б56, Б57
Бабаева Р.Ф. Б55
Бабий А.Г. У20
Баженов Н.Л. А38
Базовкин В.М. У38
Байрамов Р.А. Б27
Балоев В.А. У50 У51
Балясный Л.М. Б59, Б60, Б61
Барабанов А.Б. У06
Баранцев А.А. Б35
Бархалов Б.Ш. Б27, Б57
Белоконов В.М. А19, А20, А35
Белоус А.И. Б23
Берченко Н.Н. Б30
Бехтин Ю.С. Б35
Билевич Е.О. А44
Бирюлин П.В. У06
Богуславский А.А. У47

Болтарь К.О. П08, У02, У04, А02, А03, А07, А08, А15, А16, А18, А40, А45, А57, А58, А59, А61
Бончик А.Ю. А43
Боровков П.М. А54
Бородин Д.В. А26, А35
Борук С.Д. Б33
Бочков В.Д. А61
Брунев Д.В. П09, У01
Булат Л.П. У27
Бунегина С.Л. А27
Бунчук С.Г. А46
Бурлаков И.Д. П01, П08, У02, У25, А02, А03, А14, А15, А17, А18, А59, А61, А62, Б48, Б49
Бутров Ю.П. А35
Быков В.А. П04
Бычковский Я.С. А52
Варавин В.С. П09, У01, А32, А38, А43, Б41
Варфоломеев А.Ю. Б59
Варфоломеев С.П. А12
Васильев В.В. П09, У01, А26, А35, Б19
Васильева Л.А. А07, А08, Б47
Васильева Л.Ф. А34
Васильева Ю.В. А46
Васькив А.П. А29
Васюков И.О. А16
Ваценко П.Л. Б59
Вахитов М.А. У45
Вегтемягин С.А. У44
Веприк А. П10
Вергилес С.А. П11
Винецкий Ю.Р. У40, У52, У58, У59, Б40
Власов П.В. У04, А57
Войцеховский А.В. У21, А21, А22, А37, А39, А43, Б14
Волков В.Г. А19, А20
Володин Е.Б. У57
Вольвач В.В. У55
Воробець Г.И. У46, А04
Воробець О.И. А04
Вороня И.В. У15
Вуйчик Н.В. А44
Гавриленко В.И. У71
Гаджиев М.Б. Б10
Гайлес В.М. Б29
Галянтич А.Н. У53
Гараева А.И. У62, Б51
Гарин П.В. А55
Гасанов А.И. Б11
Гасанов Н.З. Б11
Гасанов Я.Г. Б55
Гашгольд В.Н. Б29
Гельфанд А.В. П11
Герасимов И.В. У40
Гибин И.С. У53
Гиндин П.Д. У34, А55
Глобус Е.Р. А35
Годжаев Э.М. Б27
Годованюк В.Н. У20
Голицын А.А. У30
Горбачев А.Б. Б20
Гордиенко Ю.Н. Б59
Горелик Л.И. А49
Горлачев Е.С. Б24
Горлачук П.В. Б42
Горн Д.И. Б14
Гребенщикова Е.А. П12, У63
Гременок В.Ф. Б23, Б24
Григорьев Д.В. А37
Гришнова Н.Д. У22
Громов А.В. У26
Гугля В.С. Б21
Гузев А.А. У19
Гулаков И.Р. У39
Гураль Т.И. Б24
Гусейнов Д.Т. Б05
Гусейнов Э.К. У64
Гусейнова К.М. Б11
Давыдов В.Ю. У18
Дворецкий С.А. П09, У01, У23, У71, А38, А43, А46
Демидов С.С. А07, А53
Демин А.В. Б48
Демьяненко М.А. У05
Денисов И.Г. У50, У51
Джафаров М.А. А11, Б08
Джафарова Г.С. Б01
Дзядух С.М. А21, А22
Дирочка А.И. У31
Дмитриев А.С. У29, У72
Дмитрук Н.В. А46
Добровольский Ю.Г. У46, А01, А04
Добрынин Ю.А. У45
Довгялло А.И. У28
Долганин Ю.Н. А56
Дражников Б.Н. У02, А52, А61
Другова А.А. У14

Дубов Г.А. Б24
 Дудин А.Л. У16
 Дюделев В.В. У65
 Дятлов А.Л. Б59
 Евменова А.З. А44
 Еганех М.А. Б53
 Еремчук А.И. П08, Б46, Б47
 Ермаков О.В. Б23
 Есаев Д.Г. У05
 Ефимов В.М. П05, У01, Б41
 Жаворонков Н.В. Б28
 Жегалов С.И. У42, У43
 Жолудев М.С. У71
 Журавлёв К.С. У18
 Журганов Б.Е. П12
 Забенькин О.Н. Б40
 Забудский В.В. А47
 Залесский В.Б. Б23
 Залетаев Н.Б. А02
 Кадыроглы Зафар Б25
 Зеневич А.О. У39
 Зимин С.П. Б26
 Золотухин А.В. П12
 Золотцев В.В. У53
 Зубкова Е.Н. Б32
 Иванов В.А. А06, Б24
 Иванов В.Н. У55, У56
 Иванов В.П. У50, У51
 Иванов С.В. У67
 Иванов Э.В. П12
 Ижнин А.И. А38, Б14
 Ижнин И.И. А38, А43, Б14
 Икрин А.А. У29
 Икусов Д.Г. У01
 Ильевский Д.В. Б61
 Ильинская Н.Д. П12, У63, У65, У66
 Исмаилов А.А. Б01, Б03, Б06
 Исмаилов Н.Д. У64
 Ищенко Д.В. У24, А33
 Каджар Ч.О. Б02
 Казарин Л.Н. А54
 Каленков Г.С. У07
 Каленков С.Г. У07
 Камаев Г.Н. Б29
 Капуш О.А. Б33
 Каракозов Ю.С. А40
 Карамалиев Р.А. Б02
 Карандашев С.А. У66
 Карпов В.В. У34, А51, А55, А56
 Касаткин В.А. А60
 Касаткин И.В. А31, Б21
 Кацавец Н.И. У16
 Кашуба А.С. Б48, Б49
 Керимова Т.И. Б10
 Керимова Э.М. Б03, Б11
 Кеслер В.Г. У19
 Кижаяев С.С. П12
 Кириленко Е.П. У49
 Киселев М.В. У53
 Климанов Е.А. А07, А08, А53, Б31
 Клименко А.Г. А28
 Климов А.Э. У24, А33, А34
 Князев Б.А. У05
 Ковалишина Е.А. А13
 Ковчавцев А.П. У19
 Козлов К.В. А48, А50
 Козырев М.Е. А55
 Кокин А.В. У16
 Колесников Г.В. У53
 Колмакова О.А. Б48
 Колпаков И.В. У49
 Комаров Д.А. А45
 Комков О.С. У67
 Кондранин Е.А. У32
 Кондратов П.А. А05
 Кондюшин И.С. А52
 Коновалов Г.Г. У63, У65
 Коринец С.В. У68
 Корольков В.П. А56, Б52
 Королук В.Н. А34
 Кортаев А.Г. А37
 Кортаев Е.Д. У25, А14, А17, Б49
 Коротеев Ю.М. А56
 Котков А.П. У22
 Коханенко А.П. А37, А39
 Кошавцев Н.Ф. У31, У32
 Кравченко Н.В. У54, А02
 Крапущин Д.В. А27
 Красицкий Д.М. У16
 Креопалов Д.В. Б15
 Крушельницкий О.А. У20
 Кудрявцев К.Е. У71
 Кузенко В.И. А04
 Кузенко В.Ю. А01, А04
 Кузнецов Н.С. А55, А56
 Кузнецов П.А. У02, У73, А61
 Кузнецов С.А. П11
 Кузь М.А. У46
 Кулиев Ш.М. У64, Б13
 Куликов В.Б. У06, У16, А46

Кульчицкий А.Н. Б16, Б17
Кульчицкий Н.А. А27, Б16, Б17
Куницына Е.В. У65
Курбанов К.Р. У15, Б30
Курешов В.А. У17
Курт В.И. У61, У62, Б51
Курт В.П. У50, У51
Курьшев Г.Л. У01, У19, У38, Б29
Кютг Р.Н. У18
Лазарев А.В. У69
Лазарев П.С. У44, У54, А36
Лазорский П.А. П11
Лапшин Р.В. У49
Левко Г.В. П07
Ли И.И. Б29
Липатов В.В. У45
Липин М.В. У26, А30
Лисейкин В.П. А07, А08, Б36, Б47
Лозовой К.А. А39
Лоншаков Е.А. П11, А23
Лопухин А.А. У04, А02, А03, А50, А57, А62
Луговский А.Ю. Б21
Лученко А.И. А44
Ляликов А.В. Б49
Магеррамова К.И. Б57
Мазалов А.В. У17, Б60
Мазин М.Г. А36
Макаренков А.М. У13
Максимов А.Д. А51
Маланич Г.П. Б34
Малин Т.В. У18
Мамедов А.К. Б13
Мамедов Р.К. Б54
Мамедова С.А. Б08
Мамишова Р.М. Б10
Мармалюк А.А. У17, Б42, Б59, Б60, Б61
Марущенко А.В. А56
Марчишин И.В. П09, У05
Матасов М.Д. У11, У12
Матвеев Б.А. У66
Махмутов М.С. У45
Мельников А.А. А27, Б16, Б17
Мельников О.А. Б16, Б17
Мжельский И.В. У38
Микертумянц А.Р. Б47
Мирофянченко А.Е. У25, А14, А17, Б48
Михайлов Н.Н. П06, У23, У71, А43, А46
Моисеев А.Н. У22
Монастырский Л.С. А41
Мордвин Н.Н. Б21
Морозов С.В. У71
Музафаров А.Р. У45
Мустафаева С.Н. Б05, Б06
Мынбаев К.Д. А38, А43
Назаров А.М. Б27
Насиров Э.Ф. Б08
Несмелов С.Н. А21, А22
Никифоров А.Ю. А55
Никонов А.В. У03, А15, А58, А61
Новгородов Н.Б. П11
Новоселов А.Р. А28
Нуриев И.Р. Б09, Б10
Овсюк В.Н. У05
Овчар Н.И. Б24
Оганесян Н.Н. Б45, Б46
Ольховая Ю.А. У41
Осипов Ю.В. А26, А35
Павлык М.П. А41, Б22
Падалица А.А. У17
Падалко Г.А. У32
Панкин А.Е. У52
Панова З.В. У19
Патрашин А.И. У03, А15, А59, А61, А62, Б46
Паулиш А.Г. П11, А23, А24, А25
Пашаев И.Г. Б04
Пашенко Г.А. Б34
Пацин Н.С. У24, А33, А34
Певунчиков И.В. У60
Перепелицын Ю.Н. Б28
Пермикина Е.В. Б48, Б49
Перфильев В.А. А30
Петерс А.С. А37
Петренко В.И. А55
Петров А.С. А13
Петровская З.Н. А12
Пиголкина А.М. У42
Писаревский В.К. А29, Б22
Пихтин А.Н. У67
Побойкина Н.В. А27
Пожидаев Д.А. А45
Покотило С.А. У32
Полесский А.В. У44, У54, А49
Половинкин В.Г. У38
Полунеев В.В. У04, А40, А60

Поляков А.Н. Б18
Поляков П.Б. А30
Пономаренко В.П. П01, П08
Попов О.А. У22
Потапов А.В. А54
Правдивцев А.В. У33
Предеин А.В. У01, А32, Б19
Протасов Д.Ю. У18
Прохоров Г.В. А04
Раджабли А.А. Б13
Рафаилович А.С. У36
Рева В.П. У68
Резник В.Я. Б52
Ременный М.А. У66
Ремесник В.Г. У01, У23
Рзасв Р.М. Б55
Роках А.Г. У10, У11, У12
Романов А.С. У72
Романов И.С. А39
Рудаков Г.А. Б52
Рудневский В. С. А60
Румянцев В.В. У71
Рябова А.А. У04
Рябоштан Ю.А. Б59
Сабинина И.В. П09, У01, А32
Сабитов Д.Р. У17, Б61
Савицкий Г.В. А38, А43
Савкина Р.К. А41
Савлинов К.Е. У22
Савченко А.М. Б15
Садыгов Р.М. Б10
Саликов В.Л. А19, А20
Самвелов А.В. Б45, Б46
Сапцин В.М. У15, У41
Сармин Д.В. У28
Сахаров М.В. А46
Свеженцова К.В. А44
Свидзинский К.К. У48
Свиташева С.Н. У18
Севастьянов Е.Н. А13
Седнев М.В. А07, А53, Б31, Б32
Сейди Х.Г. Б26
Селиванов А.С. А49
Селяков А.Ю. А03
Семенов А.Н. У67
Семенченко Н.А. У54
Сенник Б.Н. У35
Сердобинцев А.А. У10, У11
Серебrenникова О.Ю. П12, У63, У65
Серегина Е.В. У13
Сидорин А.В. У44, У47, У54, А50
Сидоров Г.Ю. У01
Сидоров Ю.Г. П09, У01, А38, А43
Сизов А.Л. У25, Б48
Сизов Ф.Ф. У68, А41, А44, А46
Скрылёв А.С. А35
Случак Б.А. А20
Смирнов А.Б. А41
Смирнов А.Н. У18
Смирнов Ю.В. У72
Смолий М.И. А46
Соболь В.П. Б24
Соколов С.М. У47
Соколов С.С. У47
Соколовский Б.С. А29, А41, Б22
Соколовский Г.С. У65
Солодков А.А. У06
Соляков В.Н. У37, У42, У43, У44, У47,
А36, А45, А48, А61
Сорочкин А.В. П09, А32, А38
Средин В.Г. У21, А46
Старостенко Д.А. П12, У63
Степанов Б.С. У22
Степанов Р.М. П07, А13
Степанов Р.О. У34
Степанушкин А.Г. У20
Степович М.А. У13, Б18
Стратийчук И.Б. Б34
Стусь Н.М. У66
Сунцов В.И. У45
Сусляков А.О. У01
Сысоев Д.А. Б45, Б46
Талипов Н.Х. У21, Б50
Тарабрин М.К. А50
Тарасенко В.Ф. А37
Тарасов В.В. У06
Тетерин И.И. А48
Тимофеев А.М. У39
Титов А.Г. У58, У59, Б40
Тихомиров К.П. А56
Ткаченко В.Ф. А04
Томашик В.Н. Б33, Б34
Томашик З.Ф. Б33, Б34
Тренин Д.Ю. У47, У54, А45, А48, А50
Тренина Е.О. У44
Третьяков Н.Д. У55, У56
Трищук Л.И. Б33
Тропин А.Н. А06
Тропина Н.Э. А12
Трошин Б.В. Б31

Трошков А.Е. А02
Тумм М.К.А. П11
Турапин А.М. А39
Турбин А.В. П11
Турцевич А.С. Б23
Тягур В.М. Б24
Угланов Д.А. У28
Удовицкая Р.С. А42
Ульянова Е.О. Б37 Б38 Б39
Фадеев С.В. Б30
Федоринин В.Н. П11
Фёдоров В.О. У56
Фетисов Е.А. У48, У49
Фетюхина В.Г. У42, У43
Филачев А.М. П01, П08, У02, У37
Филипов Н.Ф. У20
Фирсов Д.Д. У67
Фицыч А.И. А38
Фицыч Е.И. А43
Фомин Б.И. У05
Фролов Н.В. А54
Хакуашев П.Е. У54, А54, Б42
Халилова Х.С. Б27
Хамидуллин К.А. А36, А49, А50
Хафизов Р.З. У49
Хисамов Р.Ш. У45
Холоднов В.А. У14
Хромов В.П. Б29
Хромов С.С. У02, У73
Хрящев С.В. П11, А25
Царенко А.В. У19
Цибрий З.Ф. А44, А46
Чалый В.П. У06, У16
Чапнин В.А. Б52
Чеканова Г.В. А35
Чигирь Г.Г. Б23
Чиж К.В. Б52
Чилясов А.В. У22
Чинарёва И.В. А02, Б42
Чистов О.В. Б59, Б60
Чистохин И.Б. Б29
Чунарев Д.А. Б20
Чуркин С.Н. А56
Шабашкевич Б.Г. У46, А01
Шалин В.Б. А06
Шаронов Ю.П. А53, Б32
Шатохин Е.С. У28
Шахметов Е.Б. А30
Шведов С.В. Б23
Шевчук В.В. У20
Шерстнев В.В. П12, У63
Шерстякова В.Н. У24, А33
Шиляев А.В. А38
Ширинов М.М. Б01
Широков Д.А. (ФГУП «НПО «Орион») Б45, Б46
Широков Д.А. (ОАО «НПО «Геофизика-НВ») Б59, Б60
Широков С.В. Б47
Шишкин М.И. У10
Шкетов А.И. А50
Шкондин М.А. А45
Штанько А.Е. У07
Шулепов М.А. А37
Шумский В.Н. У24, А33, А34
Юдовская А.Д. У44, У54, А36, А49, А50
Южик И.Б. Б20
Юрьев В.А. Б52
Юрьев В.Г. У46
Яковлев Ю.П. П12, У63, У65
Яковлева Н.И. У25, А14, А15, А16, А17, А18, А58, А59, А61, А62
Якушев М.В. П09, А32, А38
Яцык В.С. У45

Правила для авторов по оформлению рукописей статей, предлагаемых к публикации в журнале «Прикладная физика»

1. Направляя рукопись статьи в редакцию журнала "Прикладная физика", авторы передают редколлегии, учредителям и издателю журнала безвозмездное неисключительное право опубликовать ее на русском языке в качестве статьи в печатной версии журнала, в электронной версии журнала в сети Интернет и на лазерных дисках, а также перевести на английский язык и опубликовать статью в англоязычном варианте журнала. При этом за авторами сохраняются их интеллектуальные права на рукопись статьи (в т.ч. "авторское право"). В связи с этим и с учетом Четвертой части (Раздел VII) Гражданского Кодекса РФ авторами должно быть представлено в редакцию письмо в следующей форме:

Лицензионный договор о передаче права на публикацию (издательский лицензионный договор)

Мы, нижеподписавшиеся, авторы рукописи _____, предоставляем редколлегии, учредителям и издателю журнала "Прикладная физика" безвозмездную простую (неисключительную) лицензию на публикацию этой рукописи статьи как в печатной, так и в электронной версиях журнала, в т.ч. в его англоязычном варианте. Мы подтверждаем, что данная публикация не нарушает интеллектуальных прав других лиц или организаций.

Подписи авторов: _____ (ф. и. о., ученая степень, дата)

Статья должна быть подписана всеми авторами. В случае нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией.

2. Рукопись статьи в редакцию представляется обязательно на русском языке, и редакционные требования, изложенные в п.п. 3—16, относятся именно к этому случаю. В 2009 г. журнал вошел в известную Программу МАИК/Pleiades Publishing/Springer, что подразумевает перевод на английский язык избранных опубликованных статей, издание и распространение за рубежом (начиная с 2010 г.) англоязычного варианта журнала под названием Applied Physics Reports.

3. Каждая статья рецензируется в соответствии с решением редколлегии журнала, при этом рецензия (рецензии) направляется редакцией журнала авторам рукописи. Решение о порядке публикации статьи принимается редколлекцией в контакте с редакцией. Статья может быть отправлена авторам на доработку или отклонена как по формальным, так и по научным причинам. В случае окончательного отклонения рукописи статьи редакция направляет авторам мотивированный отказ.

4. Любая представленная рукопись статьи должна сопровождаться экспертным заключением о возможности публикации в открытой печати, оформленным в установленном порядке. Вместо экспертного заключения может быть представлено соответствующее заявление на имя главного редактора журнала от имени руководства организации, где работают авторы, или непосредственно от имени самостоятельных авторов. В экспертном заключении или заявлении в обязательном порядке должна быть отражена возможность открытой публикации и передачи публикуемых материалов за границу. Статья, являющаяся результатом работы, проведенной в организации (учреждении) по ее заданию, должна обязательно иметь направление этой организации (или головной организации при участии нескольких организаций в этой работе).

5. Основной текст статьи должен начинаться разделом «Введение» с четкой постановкой цели и задач работы, сопровождаемой аргументами в пользу ее выполнения на фоне существующего состояния затронутой в статье проблемы. Дальнейший текст статьи также должен иметь смысловые рубризаторы (разделы и

подразделы). Заканчиваться статья должна отдельным разделом «Заключение» с перечислением основных результатов, следующих из них выводов и, по возможности, предложений по развитию исследований и использованию их результатов.

6. Объем статьи (без рисунков) не должен превышать 10 страниц формата А4 при 1,5 межстрочных интервалах, а объем статьи обзорного характера — не более 25 страниц. Материал статьи представляется в печатном виде (на бумажном носителе) в двух экземплярах и в идентичном электронном варианте на CD/DVD-диске с текстом в формате Word 2003 (отдельным файлом от рисунков). Дискеты не принимаются. Следует избегать приведения в тексте излишне подробных и громоздких математических преобразований и выражений. Оформление статьи следующее:

- статья начинается с указания УДК;
- название статьи набирается строчными буквами (кроме начальной прописной) полужирным шрифтом, размер шрифта 14, для остального текста используется простой шрифт размером 12, причем рекомендуемая гарнитура шрифта — Times New Roman;
- после названия - список авторов, инициалы авторов предшествуют их фамилиям;
- с отступлением в 2 строки представляется аннотация статьи (не более 7 строк);
- ниже аннотации перед основным текстом указываются коды классификации PACS (Physics and Astronomy Classification Scheme), по меньшей мере, до третьего уровня глубины включительно, соответствующие содержанию статьи (подробности классификации PACS в Интернет на сайте American Institute of Physics – www.aip.org/pacs);
- далее приводится список ключевых слов для данной статьи (не более десяти);
- страницы текста нумеруются без пропусков и добавлений литерных обозначений (типа 1а, 2б и т. п.), причем в сквозную нумерацию должны быть включены все элементы статьи, кроме рисунков и подписей под ними;
- внизу первой страницы текста помещается отдельный абзац (с полужирным шрифтом), содержащий контактную информацию об авторе (или авторах) в следующем виде: фамилия, имя, отчество, должность, почтовый адрес предприятия, телефон/факс, e-mail;
- после основного текста - список использованных источников под названием "Литература";
- в конце статьи название статьи, инициалы и фамилии авторов, предприятие, его почтовый адрес, город, страна, e-mail, аннотация, PACS, ключевые слова (keywords) повторяются на английском языке (поскольку журнал распространяется и за рубежом, редакция оставляет за собой право корректировать английскую часть текста без изменения его смысла);

7. Список использованных источников необходимо представлять в соответствии с требованиями, установленными системой Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) на основе существующего ГОСТ Р 7.0.5-2008. Ссылка в тексте на использованный источник оформляется в квадратных скобках, например, [1—3], [7, 8]. Ссылки на формулы, рисунки и таблицы оформляются с использованием круглых скобок, например, формула (3), уравнение (1), (рис. 2), (табл. 7).

Примеры использованных источников:

Книга: *Гроднев И. И.* Оптоэлектронные системы передачи информации. — М.: Знание, 1991.

Статьи из журналов: *Дмитриев А. Г., Царенков Б. В.* // ПТЭ. 1972. № 1. С. 208.

Lang D. V. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. No. 7. P. 3023.

8. Количество рисунков и фотографий для типовой статьи не должно превышать 5, для обзорной статьи — не более 10. Если один рисунок содержит два, три или более вариантов графических (или фото) изображений типа «рис. 2а», «рис. 2б» и т.д., то каждый отдельный вариант в этом случае засчитывается как отдельный рисунок. При превышении вышеуказанных лимитов на количество рисунков (фотографий) статья возвращается авторам на переработку. Графика (только черно-белая!) представляется в двух экземплярах на отдельных листах. На обратной стороне каждого рисунка необходимо проставить карандашом его номер, фамилии первых авторов статьи и начальные слова ее названия. Одновременно необходимо представить электронную версию рисунков на CD/DVD-диске в одном из форматов *.gif, *.jpg, *.png, *.bmp в виде отдельного файла для каждого рисунка.

9. Подписи под рисунками должны быть представлены на отдельной странице последовательно друг за другом, т. е. отдельно от рисунков. Каждая подпись должна быть по возможности лаконичной, но емкой по содержанию. Любой указываемый в подписи физический (технический) символ должен иметь там же свое словесное раскрытие. Все подписи повторяются в электронном виде в одном общем файле на принятом электронном носителе.

10. В тексте статьи, а также на рисунках предварительную разметку буквенных символов в формулах и обозначениях не производить. Простые формулы вводить в текст в формате используемого текстового редактора, более сложные формулы - с использованием редактора формул Microsoft Equation или MathType. Для символьного обозначения не векторных физических (технических) величин использовать только латинский и греческий алфавиты, при этом в тексте для греческих букв и цифр использовать прямой шрифт, для латинских букв — наклонный шрифт (курсив), векторы обозначать полужирным прямым шрифтом (предпочтительнее!!) или стрелкой над символом вектора (курсивным). Для нижних и верхних индексов физических (технических) величин русские буквы не применять, а использовать только арабские цифры, латинские или греческие буквы, но если индекс, обычно нижний, представляет собой краткую (сокращенную) форму русского слова-характеристики, то допустимо использовать в его обозначении русские буквы (курсив), например, $U_{вх}$, $I_{вых}$, $v_{зр}$ и т.п. Размерность физических величин обозначается только по-русски и прямым шрифтом.

11. Таблицы выполнять в соответствии со следующими требованиями: верхняя строка — наименование данных и размерность; следующие строки — сами данные.

12. Формулы, таблицы и рисунки должны иметь свою отдельную сквозную нумерацию. Если на конкретную формулу нет дополнительных (возвратных) ссылок в тексте или она в единственном числе, то нумерация ее не нужна. Единственная таблица и рисунок также не нумеруются.

13. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

14. Рукописи и CD/DVD-диски редакцией не возвращаются.

15. Авторы (или автор) каждой статьи после ее публикации в очередном номере журнала имеют право на получение от редакции электронной версии статьи в формате PDF (редактор Adobe Acrobat).

16. При публикации в журнале каждая статья сопровождается сноской со знаком охраны авторского права ©, поставленным перед фамилией автора (фамилиями авторов) и годом издания. В конце статьи указывается также дата поступления статьи в редакцию.

17. Решением ВАК Минобрнауки России журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«НПО «ОРИОН»**



Государственный научный центр Российской Федерации Федеральное государственное унитарное предприятие «НПО «Орион» развивается на базе созданного в 1946 году в Москве Научно-исследовательского института электронной оптики и инфракрасной техники (впоследствии НИИ прикладной физики - НИИПФ) и НИИ электронной и ионной оптики - НИИЭИО (затем НИИ «Орион»). В настоящее время ФГУП «НПО «Орион» является единственным в России Государственным научным центром в области фотоэлектроники.

В состав ФГУП «НПО «Орион» входят научно-технические и производственно-технологические центры по всем актуальным направлениям современной фотоэлектроники. Общая научно-производственная площадь объединения, составляющая около 200 тысяч кв. метров, оснащена уникальным технологическим и метрологическим оборудованием. В 2003 году начата реконструкция производства фотоприемников и фотоэлектронных модулей, специализированных технологических линий и строительство новых производственных особо чистых участков на уровне мировых стандартов.

Подготовка инженерных кадров осуществляется на базовых кафедрах в вузах Москвы - МФТИ (ГУ), МИРЭА (ТУ) и МИЭТ (ТУ), а научных кадров - в аспирантуре ФГУП «НПО «Орион». В объединении с 1946 года были подготовлены научные специалисты высокой квалификации - свыше 30 докторов наук и более 200 кандидатов наук.

Ученые ФГУП «НПО «Орион» опубликовали несколько тысяч научных статей в отечественной и зарубежной печати, написали более 20 монографий, ряд из которых опубликован за рубежом.

Специалисты объединения успешно выступают с докладами на всероссийских и международных конференциях и симпозиумах.

Специалистами объединения создано более 1000 изобретений.

В апреле 2001 года в г. Орландо (США) под руководством ФГУП «НПО «Орион» в рамках Международной конференции была проведена русская сессия «10 лет ИК-техники в России».

Межотраслевые совещания по фотоприемникам и фотоприемным устройствам, проводившиеся в НИИ прикладной физики в период с 1962 по 1991 год, с 1998 года были возобновлены в ФГУП «НПО «Орион» в новом качестве - как Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Кроме того, с 1996 года на предприятии регулярно проводится Всероссийский семинар «Проблемы теоретической и прикладной электронной оптики».

ФГУП «НПО «Орион», совместно с ВИМИ и Московским физическим обществом, является учредителем научно-технического журнала «Прикладная физика», главным редактором которого с 1998 года является генеральный директор объединения, член-корреспондент РАН А.М. Филачев.

За выдающиеся достижения в области науки и техники лауреатами Государственных премий стали 48 сотрудников объединения. Многие сотрудники предприятия удостоены правительственных наград и почетных званий. В 1996 году ФГУП «НПО «Орион» был награжден дипломом и премией Международного общества

по оптической технике (SPIE) за значительные достижения в области оптической технологии. Изделия ФГУП «НПО «Орион» были неоднократно отмечены специальными призами, дипломами, медалями (золотыми, серебряными и бронзовыми) на отечественных и зарубежных выставках в России (ранее в СССР) и различных странах мира - США, Германии, Великобритании, Франции, Швейцарии, Бельгии, Колумбии, Китае, Южной Корее.

В настоящее время на предприятии представлены все виды высоких технологий - вакуумная, диффузионная, ионно-плазменная, электронно-лучевая, лазерная и другие, что обеспечивает выполнение исследований, разработок и выпуск изделий на уровне лучших мировых достижений.

ФГУП «НПО «Орион» разрабатывает и производит в широкой номенклатуре разнообразную продукцию для оснащения оптико-электронных приборов, лазерных систем связи и локации, систем наблюдения, навигации и дальнометрии в интересах науки, промышленности, медицины, космической отрасли, в том числе:

- фотоприемники и фотоприемные устройства (в том числе линейчатые и матричные), для широкой области спектра - от ультрафиолетовой до дальней инфракрасной (от 0,2 до 120 мкм) на основе различных полупроводниковых материалов (Si, Ge, GaP, GaAsP, GaAs, InGaAs, PbS, PbSe, InSb, CdHgTe, Si:X, Ge:X);

- микроэлектронные схемы считывания, усиления и обработки фотосигналов (в том числе для работы при криогенных температурах);

- технологические устройства для ионно-плазменной обработки поверхности, нанесения тонкопленочных покрытий различного типа, ионного травления тонкопленочных покрытий и электронно-лучевой сварки.

ФГУП «НПО «Орион» проводит разработки и имеет возможности выпуска изделий фотоэлектроники по требованиям заказчика в рамках хозяйственных договоров и международных соглашений.