

Фотоэлектроника: элементная база и технология

УДК 621.383.5.029.71/73

Фотоэлектроника XXI века

А. И. Дирочка, М. Д. Корнеева, А. М. Филачёв

Проведен анализ тематики и докладов 21-й Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, которая состоялась в Москве 25—28 мая 2010 г. Одновременно с конференцией была организована выставка.

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: фотоэлектроника, конференция, приборы ночного видения.

Тематика конференции:

- фотонные и тепловые приемники излучения и формирователи сигналов изображения;
- приборы ночного видения (на основе ЭОП и тепловизионные);
- микроэлектроника для фотоприемных устройств;
- новые направления и последние достижения в фотоэлектронике и приборах ночного видения;
- нанотехнологии и метаматериалы в оптике;
- специальное программное обеспечение для фотоэлектроники и оптики.

Для участия в конференции было представлено 225 докладов. В конференции приняли участие представители почти 100 организаций (из них 32 зарубежные) из 14 стран. В выставке приняло участие 14 организаций Российской Федерации.

Можно выделить несколько направлений работы конференции, которые будут проанализированы ниже.

Современное состояние и перспективы развития фотоэлектроники

Представленные доклады этого направления содержат информацию о состоянии дел с разработкой и производством изделий современной фотоэлектроники ведущими разработчиками, о ближайшей перспективе и направлениях развития фотоэлектроники в целом.

Дирочка Александр Иванович, ученый секретарь.
Корнеева Марина Дамировна, первый зам. генерального директора.

Филачёв Анатолий Михайлович, генеральный директор.
ФГУП «НПО "Орион"», ГНЦ РФ.

Россия, 111402, Москва, ул. Косинская, 9.
Тел.: (499) 374-94-00. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2010 г.

© Дирочка А. И., Корнеева М. Д., Филачёв А. М., 2011

В постановочном докладе В. П. Пономаренко и А. М. Филачёва (ФГУП «НПО "Орион"») "Современное состояние и новые направления полупроводниковой ИК-фотоэлектроники" изложено современное состояние и направления развития приборов и материалов фотоэлектроники во всем оптическом диапазоне.

Рассмотрено состояние и последние достижения базовых технологий ИК-фотоэлектроники: фоточувствительных материалов, твердотельных фотопреобразователей электромагнитного излучения, многоспектральных и быстродействующих приборов, устройств регистрации ТГц-излучения, метаматериалов и нанотехнологий для создания новых классов оптико-электронной аппаратуры.

Описано современное состояние полупроводникового материаловедения для фотоэлектроники. Рассмотрены перспективы развития молекулярно-лучевой и МОС-гидридной технологий изготовления важнейших фоточувствительных материалов — CdHgTe, InSb, InGaAs, GaAlN, GaAsP, GaInN и др.

Приведены основные тенденции развития твердотельных фотопреобразователей на основе твердых растворов $In_xGa_{1-x}As$ и $Cd_xHg_{1-x}Te$ для области спектра ночного свечения атмосферы 1—2 мкм и результаты исследований матричных фотоприемных устройств на основе $In_{0,53}Ga_{0,47}As/InP$.

Представлены результаты создания "смотрящих" и ВЗН-матриц из $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ и InSb для областей спектра 8—12 и 3—5 мкм с числом элементов 2×96 , 2×256 , 4×288 , 6×576 , 256×256 , 384×288 , систем цифровой обработки изображений, а также матричных формирователей тепловизионного видеосигнала на их основе.

Рассмотрены перспективы создания быстродействующих фотоприемных устройств, в том числе для получения 3D-изображений в тепловизионных и активно-импульсных оптико-электрон-

ных системах и результаты разработок *p-i-n*- и лавинных фотодиодов из Si, InGaAs/InP и CdHgTe.

Представлены последние результаты создания многоспектральных фотоприемных устройств (ФПУ) для областей спектра 1—3, 3—5 и 8—12 мкм, в том числе гибридных двухспектральных ФПУ формата 2×256 из PbS и PbSe с мультиплексированием фотосигналов в охлаждаемой зоне, монолитных двухспектральных матричных ФПУ формата 2×2×288 из CdHgTe, а также двухспектральной тепловизионной камеры на основе "смотрящих" матриц формата 256×256 из CdHgTe и InSb. Обсуждаются перспективы создания фотоэлектронных модулей со "сверхдлинной" и кольцевой конфигурацией для задач космического мониторинга.

Проанализированы параметры УФ-фотоприемников на основе GaP, GaAs, GaP_xAs_{1-x} для диапазонов 0,2—0,51; 0,25—0,90; 0,25—0,68 мкм.

Обсуждены перспективы создания фотоприемников для регистрации терагерцового оптического излучения в диапазоне длин волн 30—3000 мкм (ТГц-фотоэлектроника).

Описаны новые применения метаматериалов и нанотехнологий в ИК-фотоэлектронике для построения отображающих спектрометров, мульти-, гипер- и ультраспектральной селекции. Представлены новые результаты использования туннельно-прозрачных энергетических барьеров в наноразмерных структурах для изготовления фотоприемников из CdHgTe.

Доклад V. Comrain et al. (Sofradir) посвящен новым разработкам ИК-фотоприемников во Франции. Рассмотрены прежде всего крупноформатные матрицы для "смотрящих" оптико-электронных систем. Показано, что более высокими параметрами обладают структуры типа *p*- на *n*-КРТ.

Выделено два направления в разработке фотоматриц 3-го и 4-го поколений: крупноформатные (с количеством элементов 10⁶ и более) с высокой чувствительностью и разрешением, при минимальном размере пикселей; двухполосные типа средневолновый ИК/средневолновый ИК, средневолновый ИК/длинноволновый ИК с размерами пикселя 20 мкм и менее.

В докладах О. Л. Алымова и Р. М. Степанова (ОАО «ЦНИИ "Электрон"»); **Д. А. Гиндина, В. П. Ежова и В. В. Карпова** (ОАО «МЗ "Сапфир"»); **А. Г. Степанушкина и В. Н. Годованюка** (ОАО «ЦКБ "Ритм"», Украина); **К. О. Болтаря, В. П. Пономаренко, В. Н. Солякова, А. М. Филачёва** (ФГУП «НПО "Орион"») приведена номенклатура и параметры выпускаемых и разрабатываемых на этих предприятиях фотоэлектронных приборов.

В докладе ОАО «ЦНИИ "Электрон"» рассмотрено современное состояние разработок телевизи-

онных фотоэлектронных приборов. Созданы приборы, чувствительные в инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Приведены основные параметры широкоспектральных монолитных инфракрасных фоточувствительных приборов на барьерах Шоттки с числом элементов 512×512 на силициде платины для диапазона 1,2—5,5 мкм и на силициде иридия для диапазона 1,2—10,5 мкм с числом элементов 256×256. Разработаны и выпускаются радиационно стойкие видиконы и фотоэлектронные умножители. ФЭУ-188 обладает высокой радиационной стойкостью и магнитоустойчивостью в полях до 4 Тл.

Унификация базовой планарной технологии изготовления фотодиодов на основе InSb с применением локальной имплантации ионов бериллия позволила ОАО «МЗ "Сапфир"» провести модернизацию всех ранее разработанных серийных изделий путем замены фоточувствительных элементов (ФЧЭ) с глубоким залеганием *p-n*-перехода на планарные ФЧЭ. Разработана технология изготовления матричных ФЧЭ из InSb с использованием базовых планарных технологических процессов.

В ФГУП «НПО "Орион"» к настоящему времени разработаны и выпускаются матричные фотоприемные устройства второго поколения на спектральные диапазоны 8—12 мкм (фоточувствительный материал КРТ) и 3—5 мкм (фоточувствительный материал InSb и КРТ).

Форматы фотоприемных устройств "смотрящего" типа 256×256 элементов для двух спектральных диапазонов. Разработано МФПУ формата 384×288 элементов на основе КРТ, прорабатывается вариант формата 320×256 на основе InSb.

Разработаны многорядные фотоприемные устройства форматов 2×96, 2×256 и 4×288 элементов для использования в сканирующих тепловизионных приборах с режимом временной задержки и накопления (ВЗН).

Достигнутые значения фотоэлектрических параметров МФПУ близки к теоретическому пределу, определяемому флуктуациями фонового излучения.

Конструктивно все МФПУ выполнены в унифицированных вакуумных криостатируемых корпусах с применением интегральной микрокриогенной системы охлаждения.

А. Рогальский (A. Rogalski, WAT, Польша) сделал фундаментальный обзор по ИК-фотоприемникам — фотонным, тепловым и термомеханическим. Были представлены последние успехи в мировой практике по этим направлениям.

КРТ 50+1 год. Этапы пути

Узкозонные полупроводниковые твердые растворы теллурида кадмия и ртути занимают лиди-

рующее место в производстве ИК-фотоприемников (ФП).

В 2009 г. исполнилось 50 лет со дня синтеза КРТ [1, 2] — тройного твердого раствора теллуридов кадмия и ртути. Этот важнейший полупроводниковый материал играет большую роль в развитии современной ИК-техники. В 2010 г. исполняется 50 лет с начала первых исследований КРТ в Советском Союзе и более 40 лет с начала работ по КРТ и приборам на его основе в НИИ прикладной физики (впоследствии ФГУП «НПО "Орион"»).

В СССР работы по разработке промышленной технологии для производства твердых растворов КРТ были начаты в 1972 г.

Такие работы были развернуты на Светловодском заводе чистых металлов Министерства цветной металлургии СССР. На заводе был использован весь опыт организаций, занимавшихся получением кристаллических материалов $\text{Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}$, пригодных к изготовлению малоэлементных фоторезисторов для области длин волн 8—14 мкм. Это прежде всего НИИ прикладной физики (ФГУП «НПО Орион»»), ГИПО (г. Казань), ФТИ им. А. Ф. Иоффе (Ленинград), МИСиС, Львовский госуниверситет, Черновицкий госуниверситет и т. д. При этом на заводе были испытаны все известные к тому времени методы получения (Бриджмена в различных вариациях, зонной плавки — методы Дзюба и Уеда, твердотельной рекристаллизации — также во всех известных вариациях) и обработки кристаллов.

Были заслушаны доклады "50 лет развития твердых растворов теллуридов кадмия и ртути в СССР и России" — **В. И. Стафеев, В. П. Пономаренко, И. Д. Бурлаков, К. О. Болтарь, А. М. Филачёв** (ФГУП «НПО "Орион"»); "Организация промышленного производства монокристаллических пластин $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,2; 0,3$ и $0,5$) в СССР" — **К. Р. Курбанов, Ю. Н. Гаврилюк** (Кременчуг, Украина); "Что дало изучение HgCdTe для понимания явлений переноса в полупроводниках" — **Н. Н. Берченко, А. И. Елизаров** (Львов, Украина).

Рассмотрены основные результаты и этапы создания технологии КРТ (монокристаллов и эпитаксиальных слоев) и разработки фотоприемных приборов на его основе. На начальном этапе 1960—1970 гг. разработаны физико-технологические основы выращивания КРТ и проведены его исследования, изготовлены первые образцы фотоприемников. Период 1970—1990 гг. характеризовался созданием технологии и организацией производства монокристаллов и эпитаксиальных слоев КРТ, разработкой ФПУ на основе фоторезисторов, в том числе многоэлементных, и фотодиодов (ФД). В период 1990—2000 гг. произошло

постепенное смещение приоритета в направлении разработки эпитаксиальных структур КРТ большой площади и ФПУ на основе крупноформатных матриц КРТ-ФД, интегрированных с микроэлектронной схемой обработки сигнала непосредственно в холодной зоне. В первом десятилетии XXI века в ФГУП «НПО "Орион"» на основе КРТ разработаны матричные фотоприемные устройства второго поколения как многорядного, так и "смотрящего" типов, активное внедрение которых в новое поколение тепловизионной и тепловизионно-газационной техники происходит в настоящее время.

КРТ: материал, технология, приборы

Для мегапиксельных ИК-ФП требуются пластины КРТ большой площади с заданной и высокой латеральной однородностью состава. Материаловедческая часть пленок КРТ представлена в цикле работ ИФП СО РАН, НИИ материалов "Карат" (Львов, Украина); ОАО "ГИРЕДМЕТ"; SOFRADIR; Томского госуниверситета; ФГУП "Альфа"; университета Западной Австралии и др.

Этой проблеме, в частности, посвящен доклад **М. В. Якушева и др.** (ИФП СО РАН) "Гетероструктуры HgCdTe , выращенные методом МЛЭ для мегапиксельных инфракрасных фотоприемников". Молекулярно-лучевая эпитаксия имеет несомненные преимущества перед другими методами, являясь наиболее разработанным, гибким методом для получения такого материала в виде гетероэпитаксиальных структур (ГЭС). Встроенная эллипсометрическая аппаратура позволяет с высокой точностью проводить контроль состава эпитаксиальной пленки КРТ и его изменения в процессе роста. Это дает широкие возможности для оптимизации дизайна гетероструктуры, позволяющего упростить технологию изготовления ИК-ФП с предельными параметрами, или проводить разработки многоспектральных ИК-ФП, лавинных, работающих при повышенных и комнатной температурах и других.

Одним из преимуществ метода МЛЭ при выращивании КРТ является использование дешевых кремниевых пластин большой площади. Для охлаждаемых гибридных мегапиксельных ИК-ФП существенным моментом является проблема надежности при термоциклировании от комнатной температуры до температуры жидкого азота. Данная проблема упрощается именно при использовании кремниевых подложек для выращивания КРТ.

Оптимизация процессов предэпитаксиальной подготовки поверхности кремниевой подложки, условий формирования гетероперехода подложка — буферный слой ZnTe и процессов роста КРТ позволяет выращивать ГЭС КРТ МЛЭ без анти-

фазных границ с однородным распределением по поверхности морфологических V-дефектов и ямок травления с плотностью менее 1000 и 10^7 см^{-2} , соответственно. Проведено выращивание ГЭС КРТ МЛЭ на подложках из кремния диаметром до $102,4$ мм. Максимальное отклонение состава на диаметре $76,2$ мм составляет менее $0,002$ мол. дол./см ($\Delta\lambda_{1/2} = 0,1$ мкм при 77 К) для ГЭС КРТ МЛЭ с составами $X_{\text{SnTe}} \sim 0,3$ мол. дол.

Рассмотрены также наноструктуры, многослойные структуры КРТ для ИК-ФП и их свойства. Проведен сравнительный анализ дефектной структуры гетероэпитаксиальных пленок, полученных разными методами.

Новое: идеи, замыслы, приборы

Были заслушаны очень интересные доклады **В. И. Рыжия** (University of Aizu, Япония); **Г. Н. Гольцмана** (МГПУ); **Ф. Ф. Сизова** (ИФП, г. Киев, Украина) и др.

В. И. Рыжий на основе всестороннего анализа предложил использовать углеродные слои (графены) для создания приборов — фотоприемников и лазеров для терагерцовой и средней ИК-областей спектра. Им предложен:

- *p-i-n*-фотодиод на основе многослойной графеновой структуры для терагерцовой и средней ИК-области спектра;
- лазер с оптической накачкой и вертикальным резонатором Фабри-Перо на эту же область спектра.

Рассмотрены многочисленные физические эффекты, возникающие в таких структурах.

Цикл докладов о низкотемпературных сверхпроводниковых приемниках излучения на основе тонких пленок нитрида ниобия представлен сотрудниками МГПУ (Москва). **Г. Н. Гольцман** в своем докладе "Сверхпроводниковые счетчики ИК-фотонов, терагерцовые смесители и детекторы на основе ультратонкой пленки NbN" показал, что перспективным типом счетчиков фотонов является сверхпроводниковый однофотонный детектор (Superconducting Single Photon Detector — SSPD), который по многим параметрам превосходит существующие однофотонные детекторы видимого и ближнего ИК-диапазонов, такие как лавинные фотодиоды и фотоумножители.

Квантовая эффективность SSPD в этом диапазоне (от видимого света до $1,3$ мкм) достигает 30 %, т. е. уровня, ограниченного поглощением пленки NbN, при пренебрежимо малом уровне темновых отсчетов и временном разрешении 20 пс. SSPD хорошо согласуется с оптоволокном и легко интегрируется в коммерческую двухканальную приемную систему. Система уже нашла ряд практических применений в экспериментах по оп-

тической когерентной томографии, регистрации излучения от квантовых точек с высоким временным разрешением, а также в квантовой криптографии.

Дальнейшим развитием стал SSPD в виде параллельно соединенных полосок. Такой SSPD обладает принципиально новым свойством — возможностью определять число одновременно поглощенных фотонов по величине фотоотклика детектора, поскольку амплитуда отклика детектора пропорциональна количеству падающих фотонов. Это решение одновременно позволило увеличить быстродействие детектора, так длительность импульса напряжения фотоотклика сократилась до 200 пс.

Удалось разработать SSPD с шириной полоски 54 нм, сохранив при этом сверхпроводящие свойства. Эти детекторы показывают на порядок большую чувствительность на длине волны 5 мкм и демонстрируют однофотонный отклик на 10 мкм.

Сверхпроводниковый терагерцовый смеситель (НЭВ) на эффекте электронного разогрева в пленках NbN может работать либо в режиме прямого детектирования или как смеситель. На частотах выше 1 ТГц NbN НЭВ-смесители превосходят смесители на основе туннельного перехода сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник (SIS) и диоды Шоттки, сочетая лучшую чувствительность и более широкую полосу преобразования, которая достигает 6 ТГц. Лучшее полученное значение шумовой температуры приемника 750 К на частоте $2,5$ ТГц является рекордным. НЭВ-детекторы, работающие в режиме прямого детектирования, имеют время отклика ~ 50 пс и эквивалентную мощность шума (NEP) $3 \cdot 10^{-13}$ Вт·Гц^{-1/2}.

Тема фотоприемников терагерцового диапазона была развита в докладе **Ф. Ф. Сизова** (ИФП, г. Киев, Украина) "Приемники ТГц-излучения и их применение".

Приемники ТГц-излучения играют все возрастающую роль в различных областях человеческой деятельности (астрономия, биология, определение химического состава медикаментов и взрывчатых веществ, получение изображений и др.). Рассмотрены вопросы, связанные с развитием и функционированием приемников ТГц-излучения. Обсуждены условия эксплуатации глубоко-охлаждаемых и неохлаждаемых приемников ТГц-излучения и их возможные предельные характеристики. Рассмотрены основные физические свойства и современные достижения в параметрах ТГц-приемников излучения с прямым и гетеродинным детектированием сигналов. Внимание уделено приемникам с барьерами Шоттки, SIS-приемникам, сверх- и полупроводниковым болометрам с горячими но-

сителями заряда, приемникам на основе полевых транзисторов и их предельным характеристикам.

Дальнейшее развитие ТГц-тематика получила в докладе **А. Н. Свиридова и др.** (ФГУП «НПО "Орион"») "Терагерцовые приемные устройства с квантовыми усилителями". Предложены ТГц-приемные устройства, содержащие квантовый усилитель изображения и матричный приемник (ТПУ с КУ). Разработаны математические модели, позволяющие проводить расчеты пороговых характеристик ТПУ с КУ. Проведены расчеты порогов чувствительности этих приемных устройств. При расчетах учитывались зависимости порогов чувствительности ТПУ с КУ от параметров КУ (коэффициента усиления, светосилы, эффективной ширины спектральной полосы усиления и др.), характеристик используемых в них приемников и от методов (электрических или визуальных) регистрации сигналов.

Показаны возможность и целесообразность построения активных систем видения с использованием ТПУ с КУ; высокая эффективность использования КУ при приеме слабых ТГц-сигналов. Приемные устройства с квантовыми усилителями могут иметь в 10^2 — 10^4 раз более высокую чувствительность, чем чувствительность используемых в них приемников излучения. Их использование в активных ТГц-системах позволит, соответственно, в 10^2 — 10^4 раз увеличить потенциал этих систем.

Заметный интерес вызвал доклад от группы авторов из "УОМЗ-ИПО" (г. Казань) и ФГУП «НПО "Орион"» "Интеллектуальное ФПУ, интегрированное с блоком автоматического дешифрирования многоспектральных изображений", **сделанный В. Б. Фофановым**, в котором утверждается, что с большой долей уверенности можно считать, что следующим шагом в развитии ФПУ наряду с многоспектральными, многоэлементными фоточувствительными матрицами будет интегрирование в их состав вычислительных устройств с гибким программным управлением для дешифрирования многоспектральных (гиперспектральных) изображений в реальном масштабе времени.

Матричные ФПУ

Данное направление можно рассматривать как развитие первого направления ("*Современное состояние и перспективы развития фотозлектроники*"). Представлены доклады в основном от ФГУП «НПО "Орион"» и ИФП СО РАН. Это "Фотоприемники и фотоприемные устройства на основе антимонида индия формата 320×256" **авторы И. Л. Касаткин, А. А. Лопухин, А. И. Дирочка, А. А. Рябова** (ФГУП «НПО "Орион"»); "Монолитный фотоприемный модуль 32×32", **А. В. Со-рочкин и др.** (ИФП СО РАН); "Исследование

двухспектрального многорядного фотоприемного устройства на основе ГЭС КРТ", **Яковлева и др.** (ФГУП «НПО "Орион"»); "Исследование шумов в многорядных фотоприемных устройствах на основе КРТ" **К. О. Болгарь, В. В. Полунеев, Н. Г. Ман-светов** (ФГУП «НПО "Орион"»); **Ефимов В. М.** (ИФП СО РАН) "Проблемы гибридизации охлаждаемых матричных ФПУ ИК-диапазона" и т. д.

Основным направлением в производстве ИК-МФП на данный момент является гибридная технология, когда матрица фотодиодов на основе КРТ и кремниевая считывающая интегральная схема (мультиплексор) формируются отдельно, а затем соединяются поэлементно индиевыми столбиками. Гибридные матрицы имеют ограничения по количеству пикселей и стойкости к механическим и температурным воздействиям. Монолитные ИК-МФП, в которых фоточувствительные элементы формируются в выращенных в ячейках кремниевого мультиплексора слоях КРТ, позволят избавиться от вышеперечисленных недостатков.

Авторами из ИФП РАН разработан кристалл, содержащий 32×32 фотоприемные ячейки размером 150×150 мкм, состоящих из КРТ-мезафотодиода и *n*-МОП-транзистора. Кристалл изготавливается по *n*-МОП-технологии с поликремниевыми затворами и с Al-разводкой на пластине кремния КДБ-10 с ориентацией (310).

Мультиплексор обеспечивает произвольный доступ к элементам МФП, высокую однородность смещения фотодиодов и возможность работы с большими темновыми и/или фоновыми токами. Выбранный фотодиод подключается к общей шине считывания. Мультиплексор обеспечивает считывание с частотой от 4 до 40 кадр/с.

Проведено исследование процессов, требуемых для создания монолитного ИК-ФП на основе слоев КРТ, выращенных в ячейках кремниевого мультиплексора. Определены оптимальные значения основных параметров операций изготовления монолитного ИК-ФП.

Исследовано влияние размеров мезафотодиода на его свойства. Установлено, что зависимость фототока и темнового тока от размера диода проявляется в диапазоне размеров от 30×30 до 80×80 мкм². Дальнейшее увеличение размеров не оказывает влияния на токи. При уменьшении размера от 80×80 до 30×30 мкм² происходит увеличение темнового тока. Фототок спадает прямо пропорционально уменьшению размера диода.

В НПО "Орион" исследованы параметры двухспектрального ФПУ формата 2×2×288 элементов, изготовленного на основе гетероэпитаксиальной структуры КРТ. Элементы спектрального диапазона 8—12 мкм располагаются на поверхности МФЧЭ в узкозонном фоточувствительном слое

КРТ, а элементы спектрального диапазона 3—5 мкм располагаются в кармане глубиной около 6 мкм в широкозонном фоточувствительном слое КРТ.

Гетероэпитаксиальная структура КРТ содержит два фоточувствительных слоя p -типа проводимости толщиной по 6 мкм составов $x = 0,27$ и $0,22$, выращенных в двух последовательных процессах жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) методом кристаллизации из двухфазной смеси в закрытой системе на подложке CdZnTe.

Фотоэлектрические характеристики обоих многорядных фотоприемников формата 2×288 элементов спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм близки к теоретическому пределу, обусловленному шумом фонового излучения.

В тепловизионных ИК-фотоприемниках спектрального диапазона 8—12 мкм лучшие характеристики по эквивалентной шуму разности температур и количеству дефектных элементов достигаются при граничной длине волны 10—10,5 мкм. Исследованы характеристики многорядных фотоприемных устройств (МФПУ) формата 2×96 на основе фотодиодов из КРТ с базой p -типа проводимости с граничной длиной волны до 12 мкм.

Исследованы высокочастотный, низкочастотный шумы и нестабильность тока всех элементов КРТ-МФПУ. Число фоточувствительных элементов с увеличенными шумами и нестабильностью тока существенно увеличивается с увеличением граничной длины волны. Показано, что дефектные элементы с незначительно увеличенным высокочастотным шумом имеют существенно увеличенный низкочастотный шум или нестабильность тока.

В. М. Ефимов проанализировал проблемы, возникающие при гибридизации охлаждаемых МФПУ. Показано, что по мере увеличения размеров фотоприемных матриц, возникают дополнительные задачи, связанные с уменьшением размера микросоединений и расстояния между ними.

МФПУ посвящена также значительная часть докладов направления "*Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы*".

Системы термостатирования

В этом направлении тон задавал доклад "Современное состояние разработки и перспективы развития МКС "Сплит-Стирлинг" для охлаждаемых ФПУ" **М. В. Липина** и **А. В. Громова** (НТК "Криогенная техника", г. Омск).

Изложены результаты разработки ряда модульных МКС "Сплит-Стирлинг", предназначенных для комплектации тепловизионных приборов наблюдения и прицеливания всех родов войск и коммерческого применения.

Разработанные МКС изготавливаются только из отечественных материалов и комплектующих и позволяют криостатировать фоточувствительные элементы ФПУ различного типа на температурном уровне (75—80) К при тепловой нагрузке на МКС от 0,3 до 2,0 Вт.

Приведены результаты исследований и испытаний нескольких модификаций модульных МКС в различных условиях, а также проводившейся в последнее время модернизации блоков управления МКС.

Сообщаются результаты завершенных в 2010 г. испытаний МКС космического назначения, обеспечивающей холодопроизводительность более 10 Вт и назначенный ресурс 32 000 ч.

Приводятся результаты разработки интегральной МКС "Стирлинга" массой менее 600 г, имеющей цифровой блок управления полностью на отечественной элементной базе.

Также приведены промежуточные результаты разработки МКС с охладителем с пульсационной трубой и намечены перспективы дальнейшего развития.

Другие доклады, представленные НПО "Орион", Институтом термоэлектричества АН Украины, Аэрокосмическим университетом г. Самары посвящены конкретным вопросам МКС, термоэлектрических охладителей, расчета тепловых труб и т. д.

Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

На заседаниях представлены и обсуждены 26 докладов от 14 организаций.

Значительное число докладов посвящено результатам разработки новых оптико-электронных приборов с использованием оптико-электронных преобразователей и матричных фотоприемных устройств на различные участки ИК-диапазона спектра. К числу таких докладов относятся: "Приборы для измерения скорости транспортных средств" (филиал ОАО "Катод" — СКБ приборов ночного видения и ЗАО "Стинс Коман"); "ОЭС на основе МФПУ InGaAs/InP" (ФГУП «НПО "Орион"» и МФТИ); "Формирование панорамного изображения в оптико-электронной системе с зеркальным шарниром и МФПУ на основе InSb, работающего в режиме SNAP SHOT" и "Двухдиапазонная тепловизионная система на основе матричных фотоприемных модулей из $CdHg_{1-x}Te_x$ и InSb" (ФГУП «НПО "Орион"», МГТУ и МФТИ); "Формирователь сигналов изображения на основе МФПУ формата 320×256 из InSb" (ФГУП «НПО "Орион"» и НИИ МВС ЮФУ); "Термографическая информационно-измерительная система широкого

применения" (ФГУП "Альфа") и др. Доклады продемонстрировали существенное повышение технического уровня разрабатываемых опико-электронных приборов российскими предприятиями.

Представлены работы, посвященные различным аспектам оптимизации параметров опико-электронных приборов. Особый интерес вызвали работы, представленные филиалом ФГУП «ПО "УОМЗ"» "Урал-Геофизика", в которых проанализировано влияние размера пикселя на порог чувствительности матричных фотоприемников в режиме тепlopеленгации, предложены пути оптимизации тракта обработки сигнала в лазерных дальномерах, рассмотрен метод пассивного измерения дальности по информации тепlopеленгационного канала.

Заметно возросло число докладов по вопросам коррекции неоднородности сигналов и деселекции дефектных элементов матричных и многорядных фотоприемных устройств. В этом разделе представлены три доклада ФГУП «НПО "Орион"» по вопросам адаптивной коррекции по сигналам сцены, доклад ФГУП «НПО "ГИПО"» по возможности фильтрации пространственного фурье-преобразования, доклад Национального университета "Львовская политехника" по методам улучшения качества тепловых изображений.

Рассмотрены вопросы создания метрологического оборудования для анализа характеристик опико-электронных приборов и исследований с использованием многоспектральных приборов.

В ходе обсуждения докладов и дискуссии выработаны предложения по включению в Программу следующей конференции приглашенных докладов по метрологическим аспектам ИК-техники.

Фотоприемники, фотоприемные устройства и микроэлектроника обработки сигнала

По этому направлению были представлены доклады из ФТИ РАН; ФГУП «НПО "Орион"»; ИПФ СО РАН; ИОФ РАН; Ben-Gurion University (Израиль); ФГУП «НПП "Пульсар"»; ИФ НАН Азербайджана; ОАО "Интеграл" (Минск, Республика Беларусь); Gazi University (Анкара, Турция) и др.

Цикл работ ФТИ РАН посвящен фотоприемникам на спектральный диапазон 2—5 мкм из бинарных, тройных и четверных соединений типа A^3B^5 и гетероструктур на их основе. Сюда же можно отнести доклад Ю. П. Яковлева с сотр. "Полупроводниковые лазеры в средней ИК-области спектра (2—4 мкм) на модах шепчущей галереи", которые вполне могут быть использованы для метрологических исследований фотоприемников в этой области спектра.

Для улучшения электрических и фотоэлектрических характеристик $GaInAsSb/GaAlAsSb$ и

$InAs/InAsSbP$ ФД Е. В. Куницына и др. предлагают использовать редкоземельные элементы в процессе выращивания активной области. Показано, что применение гольмия позволяет повысить токовую монохроматическую чувствительность фотодиодов и их быстродействие, уменьшить величину обратных темновых токов.

Выявлено, что предэпитаксиальная обработка поверхности подложки $GaSb(100)$ в водных растворах Na_2S позволяет управлять положением $p-n$ -перехода в гетероструктуре $GaSb/GaInAsSb$ и на 30 % повысить токовую монохроматическую чувствительность ФД в диапазоне 1,2—2,4 мкм. В то же время пассивация боковой поверхности мезоструктуры $GaInAsSb/GaAlAsSb$ -ФД в 1М-водном растворе Na_2S снижает величину обратных темновых токов более чем на порядок. В случае использования насыщенных растворов Na_2S в изопропиловом спирте величина обратных темновых токов $GaInAsSb/GaAlAsSb$ ФД снижается в 20 раз, а $InAs/InAsSbP$ -ФД — в 2 раза. Достигнута плотность обратного темнового тока $j = (1-2) \cdot 10^{-3}$ А/см² для ФД на основе $GaSb$ и $j = (6-8) \cdot 10^{-2}$ А/см² для ФД на основе $InAs$ при $T = 300$ К и обратном смещении $U = 0,2$ В, соответственно.

В работе "ИК-фотодиоды на основе многобарьерных структур, содержащих $InAs$ ", сообщается о результатах комплексного исследования электрических ($I-V$, $C-V$) и фотоэлектрических характеристик флип-чип и поверхностно облучаемых ФД на основе одиночных и двойных гетероструктур $p-InAsSbP(Zn)/InAs$ с активной областью из легированного $n-InAs$, полученных на подложках $InAs$, включая сильнолегированные подложки n^+-InAs , прозрачные для излучения в области 3,3—3,4 мкм.

И. А. Андреев и др. ("Широкополосные (2 ГГц) $GaInAsSb/GaAlAsSb$ $p-i-n$ -фотодиоды для спектрального диапазона 1,5—2,5 мкм") впервые создали и исследовали неохлаждаемые высокоэффективные широкополосные $GaInAsSb/GaAlAsSb$ $p-i-n$ -ФД для спектрального диапазона 1,5—2,5 мкм. Разработан и оптимизирован полный технологический цикл создания широкополосных ФД, включающий выращивание на подложке $GaSb(100)$ изопериодных гетероструктур $GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb$ с заданными параметрами методом жидкофазной эпитаксии, постростовую технологию формирования $GaInAsSb/GaAlAsSb$ -ФД, корпусирование ФД в специальные СВЧ-разъемы для исследования кинетики фотоотклика и измерения полосы пропускания. Созданные $GaInAsSb/GaAlAsSb$ -ФД имеют рекордно низкие значения собственной емкости $C = 2,0-3,0$ пФ без обратного смещения и 0,8—1,0 пФ при обратном смещении $U = -1$ В. Данный результат был достигнут

благодаря применению технологии выращивания ФД гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с использованием редкоземельного элемента гольмия для получения низкой концентрации и высокой подвижности носителей в активной области. Быстродействие ФД, определяемое по времени нарастания импульса фотоотклика на уровне 0,1—0,9, составляет величину 130—150 пс. Ширина полосы пропускания достигает 2 ГГц. ФД характеризуются низкими обратными темповыми токами (300—900 нА при обратном напряжении $U = -(0,5—3,0)$ В), высокими значениями токовой монохроматической чувствительности ($\geq 1,1$ А/Вт на длинах волн 2,0—2,2 мкм) и $D^*(\lambda_{\max}, 1000, 1) = 9,0 \cdot 10^{10}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2}.

В докладе **И. А. Андреев и др.** "Высокоэффективные фотодиоды для спектрального диапазона 2,5—4,8 мкм" представлены результаты исследований, направленных на создание высокоэффективных ФД, работающих при комнатной температуре в среднем ИК-диапазоне 2—5 мкм. Гетероструктуры с активным слоем InAs_{0,88}Sb_{0,12}, выращивались методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на подложках InAs. Для обеспечения пониженной деформации, вызванной несоответствием параметров решетки подложки и активного слоя был введен буферный слой из твердого раствора InAs_{0,94}Sb_{0,06}. В качестве широкозонного "окна" использовался твердый раствор InAsSbP. Разработаны ФД на основе гетероструктур InAs/InAs_{0,94}Sb_{0,06}/InAs_{0,88}Sb_{0,12}/InAsSbP с диаметрами фоточувствительной площадки 0,3 мм.

Отличительной особенностью ФД является высокая токовая монохроматическая чувствительность в максимуме спектра ($\lambda_{\max} = 4,2—4,7$ мкм), достигающая значений 0,6—0,8 А/Вт, значение плотности обратных темновых токов $(1,3—7,5) \cdot 10^{-2}$ А/см², при напряжении обратного смещения 0,1—0,2 В. Дифференциальное сопротивление в нуле достигает величины 700—800 Ом.

Большой интерес вызвал доклад **И. И. Ли и др.** "Многомодульное линейчатое фотоприемное устройство 4×(2×192) на основе InAs МДП-структур для систем тепловизионной", где были представлены конструкция и параметры многомодульного ИК-ФПУ на основе универсального гибридного линейчатого модуля InAs-МДП структур форматом 2×192. Решены следующие задачи:

- разработано ИК-ФПУ, содержащее до четырех гибридных модулей формата 2×192, стыкуемых без оптического зазора;
- повышены чувствительность, временное и пространственное разрешение.

Эти задачи решены за счет проведения комплекса работ, в частности:

- повышения быстродействия кремниевого мультиплексора за счет совмещения во времени считывания фотосигналов со строки ПЗИ-элементов и считывания сигналов на общую шину;

- снижения уровня шума в системе считывания сигналов путем оптимизации топологии устройств считывания и фотоприемников;

- повышения квантовой эффективности ФП за счет оптимизации толщин проводящих и диэлектрических слоев МДП-структуры, многослойных просветляющих покрытий на обеих сторонах кремниевого мультиплексора.

В следующем докладе **И. И. Ли и др.** "Инфракрасные фотоприемные устройства на основе системы: фотодиод—устройство считывания с прямой инжекцией заряда" представлена математическая модель многоэлементных ИК-ФПУ на основе системы фотодиод—устройство считывания с прямой инжекцией заряда (ПИ). Анализ системы проведен как с модельными, так и экспериментальными ВАХ фотодиодов. Расчет величины шумового заряда, интегрируемого под затвором накопления ПИ, позволяет:

- рассчитать все основные параметры многоэлементных ИК-ФПУ в зависимости от напряжения смещения на входном затворе устройства считывания;

- проводить детальное сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей;

- оптимизировать требования к конструктивным и фотоэлектрическим параметрам устройств считывания, необходимым для достижения заданных характеристик многоэлементных ИК-ФПУ и тепловизионных систем.

Изложены методики анализа и результаты численных расчетов уровня "геометрического" шума, гистограммы распределения D^* фотоприемных каналов многоэлементных ИК-ФПУ и NETD тепловизионных систем в зависимости от уровня неоднородности пороговых напряжений под входными затворами устройств считывания и от стехиометрического состава Hg_{1-x}Cd_xTe. При расчетах принято, что эти неоднородности описываются нормальным распределением.

Из докладов, посвященных электронике обработки фотосигнала, следует выделить доклад **Д. В. Бородина** (НПП "Пульсар") "Аналоговые фокальные КМОП-процессоры для гибридных линейных, субматричных и матричных ИК-фотоприемных устройств".

В частности отмечено, что за последние 2—3 года удалось дополнить семейство КМОП-мультиплексоров форматами 320×256 (2 типа), 4×288 и 640×512.

Первый тип микросхем формата 320×256 ячеек размером 30×30 мкм предназначен для ФД-матриц

с p -типом проводимости общей области и большими (~ 100 нА) темновыми токами (КРТ, 8—12 мкм). Через последовательный 8-разрядный порт выбирается "окно опроса" (фиксированные форматы 320×256, 256×256, 128×128 и 64×64) и задается время интегрирования от минимального $2/CLK$ до максимального $T_{\text{кадра}}/64$ (для полного окна 320×256), где CLK — тактовая частота вывода информации. Интегрирование фототока на емкостях от 0,5 до 4 пФ проводится одновременно в четырех строках матрицы с последующим выводом на четыре выхода. Кадровая частота достигает 250 Гц, рассеиваемая мощность не превышает 20 мВт.

Второй тип микросхем отличается тем, что ФД-матрицы имеют n -тип проводимости общей области и могут использоваться для фоторезистивных матриц с небольшими темновыми токами (InSb, QWIP, InGaAs). Микросхема позволяет проводить интегрирование фототока как в течение времени кадра (интегрирование следующего кадра и вывод предыдущего происходят одновременно), так и в течение произвольного времени, определяемого длительностью внешнего импульса ("мгновенная фотография"). При реализации данного проекта получены мультиплексоры с числом дефектных ячеек менее 0,01 %.

Микросхема формата 4×288 выполняет в аналоговом виде функцию временной задержки и накопления (ВЗН) по четырем элементам и предназначена для стыковки с субматрицами КРТ-ФД, 8—12 мкм.

Микросхема позволяет проводить отключение произвольного числа дефектных чувствительных элементов фотоматрицы, а также замещение тока отключенных детекторов некоторым заданным, внешним током, что дает однородность выходного сигнала по каналам. Функциональным прообразом схемы является фокальный процессор ФПУ типа ID TL061 фирмы SOFRADIR (Франция).

Микросхема формата 640×512 ячеек размером 20×20 мкм предназначена для матриц ФД типа InSb, QWIP, InGaAs. Зарядовая емкость в ячейке составляет $5 \cdot 10^6$ электронов, частота кадров полного формата достигает 120 Гц. Остальные общие функции, возможности и параметры микросхемы, в том числе по бездефектности, аналогичны реализованным в мультиплексоре формата 320×256 ячеек 30×30 мкм (тип 2).

Другие работы этого направления посвящены фотоприемникам на основе A^2B^6 , A^4B^6 , A^3B^5 , в том числе и на основе многоэлементных быстродействующих InGaAs/InP-ФД.

Микроэлектромеханические приемники ИК-излучения

В докладе "Оптические микроэлектромеханические системы для адаптивных многоспектраль-

ных ИК-приемников и матриц" профессор L. Faraone (University of Western Australia, Crawley, Australia) рассказал, что их усилия сосредоточены на развитии технологии микроэлектромеханических систем (MEMS), которая была бы совместима с большим форматом двумерных ИК-матриц фокальной плоскости.

Основная идея заключается в создании качественного электрически перестраиваемого фильтра Фабри—Перо на необходимую область спектра. Область перестройки достигала 900 нм при ширине полосы 50 Å (от 1,6 до 2,5 мкм). Приведены различные схемы реализации и сравнение с фотонными фотоприемниками.

Этой же тематике посвящен доклад Р. З. Хафизова и др. "Исследование термомеханических приемников теплового излучения". В работе представлены результаты разработки, моделирования и экспериментальных исследований ИК-фоточувствительных микроэлектромеханических (МЭМ) элементов на основе биматериальных слоев.

Разработаны конструкция и технология изготовления элементов термочувствительных МЭМ-элементов и проведено исследование их термомеханических характеристик. МЭМ-элемент представляет собой фактически трехмерную структуру, поэтому ключевым этапом в технологии его изготовления является создание подвешенной наномембраны. Мембрана формировалась на основе окиси кремния или нитрида кремния с использованием жертвенного слоя.

Регистрация смещения мембраны вследствие изгиба ее биморфной части под воздействием излучения осуществлялась оптическим и емкостным методами.

Развита физико-математическая модель и проведено численное моделирование термоотклика биморфных МЭМ-элементов. Сравнение показало хорошее совпадение экспериментальных результатов с расчетными.

Показано, что тепловые ФП с параметрами, близкими к предельным, могут быть реализованы на базе высокоразвитой кремниевой технологии МЭМС. Отсутствие необходимости глубокого охлаждения и относительная дешевизна делают их весьма привлекательными для применения в ряде областей.

Заканчивая далеко неполный обзор докладов 21-й Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, необходимо отметить наряду с расширением географии участников конференции высокий уровень результатов ведущих фирм. Можно утверждать, что представленные доклады охватывают значительный круг проблем, стоящих перед этой динамически развивающейся отраслью науки и техники.

Литература

1. Lawson W. D., Nielsen S., Putley E. H., Young A. S. Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe—CdTe // J. Phys. Chem. Solids. 1959. V. 9. P. 325.

2. Шнейдер А. Д., Гаврицак И. В. Структура и свойства системы HgTe—CdTe // ФТТ. 1960. Т. 2. С. 2079.

3. XXI Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. (25—28 мая 2010. Москва, Россия): Тез. докл. — М., 2010.

Photoelectronics of the XXI-st century

A. I. Dirochka, M. D. Korneeva, A. M. Filachev

Orion Research-and-Production Association, 9 Kosinskaya str., Moscow, 111402, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru

It is made the analysis of subjects and reports of the 21-st International Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices, which had took place at Moscow in May 25—28, 2010.

PACS: 85.60.-q

Keywords: photoelectronics, conference, night vision devices.

Bibliography — 3 references.

Received November 22, 2010