

## Фотоэлектроника

УДК 621.383+621.384

### Фотоэлектроника и приборы ночного видения

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

*Проведен анализ тематики и докладов 22-й Международной конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, а также выставки по тематике конференции, состоявшейся в Москве 22–25 мая 2012 года.*

PACS: 42.70.Nq

*Ключевые слова:* конференция, фотоэлектроника, выставка, приемники излучения, обработка сигнала.

#### Введение

XXII Международная научно-техническая конференция, школа молодых специалистов и выставка по фотоэлектронике и приборам ночного видения проведены с 22 по 25 мая 2012 г. на площадке ФГУП «НПО «Орион», Государственного научного центра Российской Федерации [1].

Тематика конференции:

- полупроводниковые приемники излучения и формирователи сигналов изображения (исследования фотоприема и новых материалов; технология, включая электронную и ионно-плазменную; системы охлаждения и методы обработки сигнала);
- тепловые приемники излучения и формирователи сигналов изображения (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 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.

В оргкомитет конференции было представлено 208 докладов. В конференции приняли участие представители почти 100 организаций (в т.ч. 15 зарубежных) из 14 стран. В выставке по тематике конференции приняло участие 17 организаций Российской Федерации.

Участники конференции и выставки высоко оценили научно-технический и организационный уровень конференции и отметили, что конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения занимает ведущее место в России по данному научно-техническому направлению.

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

#### Современное состояние и перспективы развития фотоэлектроники

В этом разделе доминировали работы, представленные ФГУП «НПО «Орион» (РФ), SOFRADIR (Франция), IRnova (Швеция), ИФП СО РАН (РФ), SET S.A.S. (Франция), ОАО «ЦНИИ «Электрон» (РФ).

В докладе **Филачева А.М. и др.** «Состояние и перспективы развития твердотельной фотоэлектроники в России» рассмотрено состояние, последние достижения и проблемные вопросы одного из важнейших научно-технических направлений, а именно, твердотельной ИК-фотоэлектроники. Основной тенденцией в настоящее время является снижение весогаба-

Дирочка Александр Иванович, ученый секретарь<sup>1</sup>, профессор<sup>2</sup>.

Корнеева Марина Дамировна, первый заместитель генерального директора — директор по экономике и финансам<sup>1</sup>, профессор<sup>2</sup>.

Филачев Анатолий Михайлович, генеральный директор<sup>1</sup>.  
<sup>1</sup>ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.

Тел.: 8–499–374–94–00. E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, Московская область,

г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2013 г.

© Дирочка А.И., Корнеева М.Д., Филачев А.М., 2013

ритных показателей и потребляемой мощности фотоэлектронных модулей. Для улучшения данных показателей применяют матричные фотоприемные устройства (МФПУ) с уменьшенным шагом элементов и МФПУ, работающие при повышенных температурах фоточувствительного слоя.

Сохраняется тенденция по наращиванию формата и дальнейшему снижению шага фоточувствительных элементов (ФЧЭ). В спектральном диапазоне 3–5 мкм анонсируется шаг 10 мкм, а в коротковолновом диапазоне 1–3 мкм обсуждается шаг 5 мкм. В длинноволновом диапазоне 8–12 мкм ведущими фирмами созданы МФПУ на основе твёрдого раствора кадмий теллур – ртуть теллур (КРТ) формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм.

В спектральной области 3–5 мкм широко используются матрицы как на КРТ, так и на антимониде индия.

МФПУ на коротковолновый ИК-диапазон 0,9–1,7 мкм на основе InGaAs в настоящее время освоили практически все ведущие производители. Основные тенденции совершенствования этого типа матриц – расширение спектрального диапазона чувствительности в видимую часть спектра до 0,4 мкм, а также дальнейшее снижение размеров чувствительных элементов.

МФПУ на квантовых ямах (QWIP) имеют высокую однородность параметров ФЧЭ и высокие показатели по количеству работающих элементов, превышающему 99,9% в мегапиксельных МФПУ, при рабочей температуре фоточувствительного слоя 70–73 К.

Активно ведется разработка МФПУ на основе сверхрешеток 2-го типа, которые, как надеются разработчики, смогут конкурировать с МФПУ на основе InSb и КРТ. Однако в настоящее время их роль не является определяющей.

Постоянно растущим остается рынок неохлаждаемых микроболометрических матриц на спектральный диапазон 8–12 мкм для ИК-систем, не требующих предельных характеристик чувствительности.

В России большинство из перечисленных направлений предусмотрены в действующих сейчас Федеральных целевых программах. Продолжается работа с проектами планируемых федеральных программ с целью расширения работ по твердотельной ИК-фотоэлектронике как в части разработки приборов и промышленных технологий, так и в части фоточувствительных материалов.

В настоящее время разработаны промышленные технологии изготовления и готовые к выпуску серийно-пригодные МФПУ и фотоэлектронные модули как смотрящего, так и многорядного типов: форматы 4×288, 256×256, 320×256, 384×288 элементов.

Особое место в современной фотоэлектронике занимают МФПУ для ультрафиолетового диапазона спектра.

В докладе **David Billon-Lanfrey** изложены свойства и параметры охлаждаемых ИК ФП, разработанных и производимых фирмой SOFRADIR. Обсуждаются фоточувствительные модули из КРТ, антимонида индия и QWIP из арсенида галлия. Особое внимание уделено МФПУ из КРТ с размером пикселя 15 мкм как одной из самых перспективных разработок. SOFRADIR производит ряд матриц среднего и длинноволнового диапазона формата от 384×288 до 1280×1024 элементов.

Впервые на конференции был представлен доклад от фирмы IRnova AB (Швеция), которая специализируется, в основном, на QWIP-фотоприёмниках. Показано, что QWIP-технология в области инфракрасного диапазона 8–12 мкм может успешно конкурировать с КРТ-технологией за счет высокой однородности получаемого изображения, процента выхода годных пикселей и цены.

Доклад **Михайлова Н.Н. и др.** «Двухспектральные фотоприемные устройства на основе HgCdTe» (ИФП СО РАН) посвящён разработке технологии охлаждаемых двухдиапазонных фотоприемных устройств формата 2×288×4 элемента на основе гетероэпитаксиальных наноструктур теллурида кадмия и ртути, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Технология изготовления двухдиапазонных ИК ФП включает гибридную сборку фоточувствительных элементов, полученных ионной имплантацией бора, с кремниевым мультиплексором с помощью индиевых столбов разной высоты. Фотоэлектрические параметры двухдиапазонных фотоприемных устройств ограничены фоном.

В ОАО «ЦНИИ «Электрон» (**Степанов Р.М. и др.** «Фоточувствительные модули на основе ПЗС в ОАО «ЦНИИ «Электрон»») ведутся работы по созданию прибора (ЭОП с электронным выходом) на основе утонченных матриц, работающих в режиме электронного возбуждения и обладающих высокой чувствительностью и улучшенным отношением сигнал–шум по сравнению с ЭОП-ом, с числом элементов

768×580 и размером чувствительного элемента 17×34 мкм. Размер изображения на фотокатоде 13,1×9,8 мм. Получено усиление в матрице 800–1000 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 спектральную область 1–1,6 мкм. Фотокатоды для этого диапазона создаются с использованием явления усиления фотоэмиссии структур InP–InGaAs электрическим полем.

Наиболее перспективными для УФ–области являются фотокатоды с отрицательным электронным средством на основе эпитаксиальных структур AlGaIn.

### Матричные фотоприёмные устройства (МФПУ)

Подавляющее большинство докладов в той или иной мере касались МФПУ.

Большой интерес вызвал доклад **Ефимова В.М. и Guenael Ribette** «Новая система сборки мегапиксельных ИК ФПУ» (ИФП СО РАН, SET S.A.S. Франция) и доклад от тех же организаций «Новейшие средства гибридизации охлаждаемых инфракрасных фотодетекторов». Предложена новая технология сборки крупноформатных МФПУ при комнатной температуре и сниженных механических условиях. В мягкие микроконтакты на первом кристалле втыкаются тонкостенные микротрубки (толщина стенки 0,1 мкм) диаметром 4 мкм, сформированные на другом кристалле. Процесс идет при пониженной температуре (комнатной) и пониженном давлении.

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.

В докладе **ФГУП «НПО «Орион»** «Матричные инфракрасные фотоэлектронные модули НПО «Орион» представлена гамма приборов, разрабатываемых и разработанных ФГУП «НПО «Орион» на область спектра от УФ до дальнего ИК на различных фоточувствительных материалах. Приведены параметры фотоэлектронных модулей.

Доклад **Якушева М.В. и др.** «Фотоприёмный модуль формата 640×512 на основе гетероструктур CdHgTe/Si (310), выращенных методом МЛЭ» (ИФП СО РАН) посвящён

исследованию 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 и мультиплексор формата 640×512 для спектрального диапазона 3–5 мкм.

Неохлаждаемые микроболометрические МФПУ на основе оксидов ванадия для ИК- и ТГц-области проанализированы в работе **Демьяненко М.А. и др.** из ИФП СО РАН.

Температурные зависимости параметров МФПУ на основе структур с квантовыми ямами исследованы в работе Тарасова В.В. и др. из ОАО «ЦНИИ «Циклон».

### Фотоприёмники, фотоприёмные устройства и материалы для них

В этом разделе содержательный доклад был прочитан **Степанушкиным А.Г.** «Модернизация и производство многоэлементных фотоприёмных устройств на основе селенида свинца» (ОАО «ЦКБ Ритм», ОДО «Завод Кварц», Черновцы, Украина). Изложен комплекс работ, выполненных авторами по модернизации 14-элементного фотоприёмного устройства на основе селенида свинца. Приведены результаты, полученные при промышленном производстве данных ФПУ, проанализирован достигнутый уровень по фотоэлектрическим параметрам и надежности изделий.

После проведения работ по модернизации было изготовлено более 50 приборов и 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 вольтовой чувствительности  $DS_v = 10-30\%$ ;
- изделия успешно выдерживают испытания на виброустойчивость, воздействие термочиклов, испытания на холодо- и теплоустойчивость.

В докладе **Курбанова К.Р.** (Кременчугский национальный университет, Украина) «Сканирующие матричные ИК-преобразователи и их автокалибровка. Исторические аспекты и перспективы» подробно рассмотрены и проанализированы проблемы безэталонной автокалибровки сканирующих матричных преобразователей сигналов и изображений, их история, современное состояние и перспективы дальнейшего развития.

Этим же проблемам посвящён цикл работ, представленных ФГУП «НПО «Орион» («Исследование свойств градиентной коррекции

неоднородности фотоприёмных устройств с микросканированием», «Анализ трёхпараметрической коррекции неоднородности матричных ФПУ» и др.).

В работе «Фоточувствительные МДП-структуры со сверхтонким плазменным окислом на InAs» из ИФП СО РАН представлены результаты пассивации поверхности InAs сверхтонким плазменным окислом (~3 нм), полученным в высоковакуумной камере SSC Riber. Изучались вольтамперные 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.

**Мармалюк А.А. и др.** (ФГУП НИИ «Поллюс» Москва, Россия) в своём докладе «МОС-гидридная эпитаксия для полупроводниковой фотоэлектроники УФ-диапазона» проанализировали применимость МОС-гидридной эпитаксии как метода формирования нитридных эпитаксиальных гетероструктур фотоэлектронного назначения. Рассмотрены особенности процесса получения AlN и AlGaIn на подложках сапфира в условиях МОС-гидридной эпитаксии. Представлены результаты оптимизации процесса роста гетероструктур GaN/AlN для фотоэмиттеров с отрицательным электронным средством. Предложены подходы по повышению качества материала с учетом специфики приборного применения. Изучены вопросы получения гетероструктур GaN/AlGaIn для  $p-i-n$ -фотодиодов и диодов с барьером Шоттки для УФ-диапазона.

Ряд докладов посвящён технологическим аспектам получения слоёв КРТ и создания фоточувствительных структур, а также технологии создания приборов на квантовых ямах.

### Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Большой интерес вызвал доклад группы авторов из ИФП СО РАН «Конвертер терагерцового излучения в инфракрасное на основе метаматериалов для детекторов терагерцового диапазона».

На основе метаматериалов разработан конвертер терагерцового (ТГц) излучения в ИК-излучение и визуализатор ТГц-излучения. 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 излучения 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 схемотехнического 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.

Интересен вывод **Винецкого Ю.Р.** (Филиал ОАО «ПО УОМЗ» Урал-Геофизика»), сделанный в докладе «Как выбирать размер пиксела ИК-матрицы теплопеленгатора при произвольной функции рассеяния оптической системы». Авторы утверждают, что для смотрящей матрицы, в противоположность принятому представлению о том, что в пиксел оптимального размера должна укладываться подавляющая часть мощности пятна рассеяния точки, 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, т.е. дифракционно-ограниченного случая, для которого и были получены простые аналитические выражения, описывающие оптимальный размер пиксела  $x_{opt}$  в зависимости от дифракционного радиуса  $r_d$  пятна рассеяния точки как  $x_{opt} \sim 3/8 r_d$ , а также функцию потерь пороговой мощности при размере пиксела, отличном от оптимального.

Ряд докладов был посвящён проблеме коррекции геометрических шумов матричных фотоприёмных устройств.

Два заседания было посвящено *проблеме метрологии* фотоприёмников. В основном это были доклады, представленные от ОАО «НПО «ГИПО». («Критерии качества охлаждаемых матричных фотоприёмников для ИК-области спектра (взгляд разработчика ТПВ)», «Аппаратно-методическое обеспечение определения параметров охлаждаемых матричных фотоприёмников для ИК-области спектра», «К вопросу о передаче размеров единиц энергетической яркости моделям абсолютно черных тел», «Метрологическое обеспечение современных оптико-электронных приборов»). Представлены были также доклады от других организаций

по экспериментальному и методическому обеспечению задач метрологии. Несмотря на жаркие дискуссии кардинальных решений получено не было.

Среди работ, посвящённых разработке *термоохладителей* для фотоприемных устройств, следует выделить доклад **Л.П. Булата** (НИУ ИТМО С-Петербург, Россия) «*Об эффективности материалов для термоэлектрического охлаждения*». Автор проанализировал состояние дел с термоэлектрическими материалами (в том числе на основе низкоразмерных структур) и пришел к выводу о перспективности использования объёмных наноструктур из твердых растворов на основе  $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ , термоэлектрическая добротность которых на 20–25% выше, чем в лучших коммерческих термоэлектрических материалах.

**М.В. Липин** (ООО «НТК «Криогенная техника», Омск) в своём докладе «*Современное состояние разработки миниатюрных микрокриогенных систем для охлаждаемых ФПУ*» сообщил о последних разработках МКС на предприятии.

Произошедший в последние годы прогресс в разработке миниатюрных 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.

МКС изготавливаются только из отечественных материалов и комплектующих и позволяют термостатировать ФЧЭ фотоприемных устройств различного типа на температурном уровне (65–130) 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.

### Новые идеи, замыслы, приборы

Новые идеи использования графена в фотоприемной электронике изложены в докладах **авторов из Японии** («*Graphene-based electro-optical modulators: effect of plasma oscillations resonant excitation*» и «*Terahertz and infrared graphene optically-pumped and injection lasers: concept, comparison, and problems of realization*»). Теоретически рассмотрена возможность созда-

ния электро-оптических модуляторов на ИК- и ТГц-области спектра. Предложен новый механизм работы такого модулятора.

На основе многослойной графеновой структуры с нулевой запрещённой зоной проанализированы возможности создания инжекционных лазеров и лазеров с оптической накачкой на ИК- и ТГц-области спектра.

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 ИК-излучения. Оптическая система считывания в ближнем ИК-излучении передает изображение рельефа на фоточувствительную матрицу, например, кремниевого прибора с зарядовой связью. Биморфные приемники ИК-изображения развиваются как альтернатива промышленно освоенным, но дорогостоящим болометрическим ИК-матрицам, которые требуют сложной совмещенной технологии изготовления микроэлектромеханических систем (МЭМС) и транзисторных мультиплексов. 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.

В докладе **Свидзинского К.К. и Фетисова Е.А.** (МИЭТ) «*Оценка чувствительности неохлаждаемых приемников ИК-изображения на основе микрооптомеханических систем с оптическим считыванием*» проанализирован режим работы таких ФП и показано, что 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 излучения для формата ~ 200×300 могут обеспечить NETD " 30 мК, не уступая матрицам микроболометров, при этом являясь технологически значительно менее сложными.

В работе «*Термомеханическая чувствительность биморфных ИК-сенсоров на основе микрооптомеханических систем*» (**Фетисов Е.А., Хафизов Р.З. и др.**, МИЭТ) 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.

Интересна работа «Комплексное исследование обработки синтезированных изображений», представленная сотрудниками ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, ФГУП «НПО «Орион» и МФТИ.

Синтез изображений, регистрируемых каждым каналом многоканальной (многодиапазонной) информационной системы — необходимый этап 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, что позволяет приступить к эффективному решению задач обнаружения, распознавания и измерения.

При разработке систем, решающих такие задачи, необходимо комплексное исследование фундаментальных принципов построения алгоритмов обработки многодиапазонных изображений. Наряду с этим 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.

В докладе изложены 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.

Доклады, представленные **проф. Роках А.Г. с сотрудниками** из Саратовского госуниверситета («Продольный вторично-ионный фотоэффект на структуре SiO-AlGaAs-GaAs», «Фотоиндуцированный выход вторичных ионов из структуры SiO-AlGaAs-GaAs», «Оценка мощности световой накачки узкозонной фазы при фотоиндуцированном ионном распылении»), вызвали дискуссию, поскольку явление вторично-ионного фотоэффекта (ВИФЭ) на конференции рассматривалось впервые.

Изучение 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 авторы наблюдали на полупроводниковой структуре SiO-AlGaAs-GaAs, 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.

В докладе «Фурье-спектрометр, как система голографического изображения микрообъектов в ИК диапазоне» (**С.Г. Каленков и др.**, МГТУ «МАМИ»), экспериментально подтверждена возможность отображения пространственных характеристик объекта на основе метода Фурье-спектроскопии. По мнению авторов, предлагаемый метод имеет хорошие перспективы для записи голограмм микрообъектов в ИК-диапазоне спектра.

### Электроника обработки фотосигнала

Среди докладов этого направления следует выделить доклады **Ревы В.П., Коринеца С.В. и Сизова Ф.Ф.** (ИФП НАН Украины) «Схемы считывания для крупноформатных матриц ИК-фотодиодов среднего и длинноволнового диапазонов спектра» и **Хромова С.С. и Кузнецова П.А.** (ФГУП «НПО «Орион») «Мультиплексирование фотосигналов в фоточувствительных матрицах второго поколения».

В первой работе представлены параметры разработанных и изготовленных схем считывания формата 320×256 и 640×512. Схемы обеспечивают работу матриц ИК-фотодиодов в режиме «мгновенной фотографии» («snapshot»)

в наиболее используемых фиксированных форматах и в произвольном формате с произвольным расположением «окна». Схема считывания для ИК фотодиодных матриц длинноволнового диапазона формата 320×256 с размерами пикселей 30×30 мкм позволяют получать зарядовую емкость порядка  $3 \cdot 10^7 e$ , уровень шума ниже 3000  $e$  и динамический диапазон более 75 дБ. Архитектура схемы считывания формата 640×512 для ИК фотодиодных матриц средне- и длинноволнового диапазонов спектра обеспечивает работу фотоприемной матрицы в режиме (snapshot) и осуществляя считывание информации в двух режимах:

а) «интегрирование, затем считывание» (ITR);

б) «интегрирование во время считывания» (IWR).

При размере пикселя 25×25 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 тестирования схем считывания при комнатной температуре предусмотрена цифровая подстройка параметров. Так как площадь кристаллов схем считывания превышает 100 мм<sup>2</sup>, 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.

Во второй работе проведен анализ технических требований, предъявляемых к матричным ФПУ потенциальными потребителями и выделены 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: 2×1, 2×2, 4×4 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 предложены структурные схемы матричных мультиплексоров с реализацией вышеперечисленных функций.

**П.С. Лазарев** (ФГУП НПО «Орион», МФТИ) в своем докладе проанализировал методы построения блоков электронной обработки для МФПУ и их влияния на шумовые характеристики прибора.

Отдельно следует выделить группу докладов сотрудников Физико-технического института РАН. Тематика их работ – приборы для ближней и средней ИК-области на основе соединений  $A^3B^5$ . Представлены результаты исследований от оптических свойств гетеросистемы InSb/AlInSb/GaAs до мощных светодиодов на область спектра 1,6–4,6 мкм.

В докладе **Андреева И.А. и др.** «Высокоэффективные быстродействующие GaInAsSb/GaAlAsSb  $p-i-n$ -фотодиоды (полоса пропускания 2–10 ГГц) для спектрального диапазона 1,3–2,4 мкм» представлены результаты исследования разработанных неохлаждаемых быстродействующих  $p-i-n$ -фотодиодов с мостиковым фронтальным контактом для регистрации коротких импульсов излучения. 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 глаз человека окне прозрачности атмосферы, в системах диодно-лазерной спектроскопии газов и молекул, в медицине и т.д.

Главной конструктивной особенностью фотоприемника с мостиковым контактом является отделение чувствительной мезоструктуры от контактной. Быстродействие GaInAsSb/GaAlAsSb фотодиодов, определяемое по времени нарастания импульса фотоотклика на уровне 0,1–0,9, составляет величину 90–150 пс. Ширина полосы пропускания 2–10 ГГц. Фотодиоды характеризуются низкой величиной темновых токов  $I_D = 200–1500$  нА при смещении  $U = -(0,5–3,0)$  В, высокими значениями токовой монохроматической чувствительности  $S_1 = 1,10–1,15$  А/Вт и обнаружительной способности  $D^* (I_{max}, 1000, 1) = 9,0 \cdot 10^{10}$  Вт<sup>-1</sup>·см·Гц<sup>1/2</sup> на длинах волн 2,0–2,2 мкм.

В докладе **Карандашева С.А. и др.** «Поверхностно облучаемые фотодиоды на основе InAsSb ( $\lambda_{0,1} = 4,5$  мкм), работающие при тем-

пературах 25–80 °С» представлены данные о распределении плотности тока и эффективности сбора фотогенерированных носителей заряда, а также приведен анализ зависимости токовой чувствительности  $S_I$  и обнаружительной способности  $D_{\lambda_{\max}}^*$  от геометрических характеристик контакта в поверхностно облучаемых ФД на основе структур  $n\text{-InAs}/n\text{-InAsSb}/p\text{-InAsSbP}$ , имеющих длинноволновую границу чувствительности 4,5 мкм (25 °С) при температурах 25–80 °С.

**Ю.П. Яковлев** в своем докладе «Мощные светодиоды в средней ИК-области спектра (1,6–4,6 мкм) на основе узкозонных соединений  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ » сообщил о разработке высокоэффективных светодиодных наногетероструктур в системе GaSb–InAs, излучение которых полностью перекрывает ближний и средний ИК-диапазон спектра (1,6–4,6 мкм). Исследованы оптические и электрические характеристики структур в широком температурном интервале (–30 ÷ +50 °С). Созданы конструкции миниатюрных светодиодных излучателей со встроенным термоохладителем и термосенсором, а также многоцветных светодиодных линеек и матриц.

Светодиодные наногетероструктуры для спектрального диапазона 1,6–2,5 мкм выращивались на подложках из антимонида галлия. В качестве активной области использовали четверной твердый раствор InGaAsSb. Электронное ограничение с двух сторон активной области обеспечивали широкозонные четверные твердые растворы GaAlAsSb, изопериодные подложке GaSb. В основе технологии создания светодиодов для спектрального диапазона 1,6–2,5 мкм лежит технология эпитаксии изопериодных многослойных наногетероструктур.

Светодиодные наногетероструктуры на спектральную область 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  $\text{InAs}_{0,63}\text{Sb}_{0,12}\text{P}_{0,25}$  для  $2,7 < \lambda < 3,4$  мкм и тройной твердый раствор  $\text{InAs}_{0,97}\text{Sb}_{0,03}$  для  $2,9 < \lambda < 3,7$  мкм. Для обеспечения необходимого электронного ограничения с двух сторон активной области использовали широкозонные четверные твердые растворы InAsSbP.

Структуры выращивались методом газовой фазной эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD) в реакторе горизонтального типа.

Достигнута мощность излучения для светодиодов диапазона 1,6–2,2 мкм до 2 мВт в квазинепрерывном режиме и до 100 мВт в режиме коротких импульсов ( $t=500$  нс).

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

- быстрое действие на 3 порядка выше, чем у тепловых источников;
- 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 (0,3×0,3 мм) позволяет создавать исключительно компактные излучатели.

### Заключение

Заканчивая далеко не полный обзор докладов 22-й Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, необходимо отметить высокий уровень результатов ведущих фирм, и можно утверждать, что представленные доклады охватывают значительный круг проблем, стоящих перед этой динамически развивающейся отраслью науки и техники.

### Литература

1. XXII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. (22–25 мая 2012. Москва, Россия). Труды конференции. Москва, ГНЦ ФГУП «НПО «Орион», 2012.



## Photoelectronics and night viewing devices

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

Orion Research-and-Production Association  
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

***The analysis of a research area and reports of the 22-nd International Conference on Photoelectronics and Night Viewing Devices is presented in the article. The Conference and Exhibition were realized in Moscow on May 22–25, 2012.***

PACS: 42.70.Nq

*Keywords:* conference, photoelectronics, exhibition, photodetectors, signal processing.

Bibliography – 1 reference

*Received April 10, 2013*