

# Фотоэлектроника

УДК 621.383

## Направления развития современной фотоэлектроники (обзор по материалам XXIII Международной конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения)

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

*Проведен анализ работы (тематики и докладов) 23-й Международной конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения и выставки по тематике конференции, которые состоялись в Москве 28—30 мая 2014 года.*

PACS: 85.60.-q

*Ключевые слова:* фотоэлектроника, конференция, выставка, доклад, фотоприемное устройство, прибор ночного видения.

### Введение

XXIII Международная научно-техническая конференция, школа молодых специалистов и выставка по фотоэлектронике и приборам ночного видения были проведены в Москве с 28 по 30 мая 2014 г. на площадке Государственного научного центра РФ ОАО «НПО «Орион» [1]. Конференция организована ОАО «НПО «Орион» и проведена при поддержке:

Министерства промышленности и торговли РФ;  
Министерства образования и науки РФ;  
Государственной корпорации «Ростехнологии»;  
ОАО «Швабе»;  
Российской академии наук;  
Российского фонда фундаментальных исследований;  
Правительства г. Москвы;  
Оптического общества им. Д. С. Рождественского.

Тематика конференции включала следующие основные вопросы:

- полупроводниковые и тепловые приёмники излучения, формирователи сигналов изображения;
- методы обработки сигнала;
- техника тепловидения и ночного видения;
- новые направления и последние достижения в фотоэлектронике;
- микроэлектроника для фотоприёмных устройств, в т. ч. криогенная;
- метрология приема оптического излучения;
- новые технологии и материалы в фотоэлектронике;
- микрокриогенная техника;
- фотоприемники УФ-диапазона;
- многоспектральные приемники излучения;
- программное обеспечение для фотоэлектроники и оптики.

Для участия в конференции было заявлено 203 доклада, из них 12 пленарных и 73 устных. Авторы и участники являлись представителями 110 организаций (20 зарубежных) из 9 стран. В выставке по тематике конференции приняло участие 9 организаций Российской Федерации.

### Памяти Л. Н. Курбатова

23-я Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения была посвящена памяти Леонида Николаевича Курбатова (1913—2004 гг.), члена-корреспондента АН СССР (РАН), научного руководителя НИИ прикладной физики (в дальнейшем НПО «Орион») Миноборонпрома СССР, одного из идеологов и создателей этой конференции, сто-

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

**Корнеева Марина Дамировна**, зам. генерального директора<sup>1</sup>, профессор<sup>3</sup>.

**Филачёв Анатолий Михайлович**, генеральный директор<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>ОАО «НПО «Орион».

Россия, 11123, Москва, Шоссе Энтузиастов, 46/2

Тел.: (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (МФТИ)

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

<sup>3</sup>Московский институт радиоэлектроники и автоматики (МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 11 августа 2014 г.

© Дирочка А. И., Корнеева М. Д., Филачёв А. М., 2014

ление со дня рождения, которого отмечалось в 2013 году.

Программа конференции открылась докладом Дирочки А. И. и Филачёва А. М. «Л. Н. Курбатов и фотоэлектроника». А. М. Филачёв ярко и интересно рассказал об основных моментах жизни и деятельности Л. Н. Курбатова, начиная с детских лет, проведенных в Туркестане (современный Узбекистан), проведя слушателей по нелёгкому пути будущего члена Академии наук. Ташкент — Ленинград — Псков — Ленинград — «дорога жизни» по льду Ладожского озера — Киров — Ленинград — Москва. Учёба в Питерском Политехе, рядом с выдающимися профессорами Семёновым Н. Н., Кикоиным И. К., Френкелем Я. И. и студентом И. Померанчуком способствовала быстрому становлению Л. Н. Курбатова как личности и учёного.

В НИИ прикладной физики, после работы в Псковском пединституте (недолго), Военно-морской медицинской академии и Государственном оптическом институте, Курбатов Л. Н. пришёл уже зрелым учёным с чёткой программой дальнейшего развития фотоэлектроники.

А. М. Филачёв подробно рассказал о работе и достижениях Л. Н. Курбатова на посту научного руководителя НИИПФ. Зал тепло принял доклад об Л. Н. Курбатове, так как значительная часть присутствующих имела возможность непосредственно взаимодействовать с этим замечательным человеком.

В деловой части можно выделить несколько направлений работы конференции, которые будут проанализированы ниже.

### Современное состояние и перспективы развития фотоэлектроники

В этом разделе задавали тон работы, представленные ОАО «НПО «Орион» (РФ), ИФП СО РАН (РФ), SET S.A.S. (Франция), ОАО «ЦНИИ «Электрон» (РФ).

В докладе Филачёва А. М. и др. «Современные тенденции создания приборов регистрации оптического излучения» рассмотрены основные направления развития современных технологий фотосенсорики и полупроводниковых материалов, фоточувствительных в инфракрасных областях спектра, отвечающих основным «окнам прозрачности» земной атмосферы 1—2,5 мкм, 3—5 мкм и 8—14 мкм, а также в ультрафиолетовом диапазоне.

Отмечены основные тенденции и направления современной фото- и оптоэлектроники, связанные с созданием новых методов регистрации сверхслабых оптических сигналов, быстродействующих и многоспектральных систем, инфракрасным 3D-видением, «высокотемпературными» фотоприемни-

ками и др. В последнее время начали реализовываться идеи использования метаматериалов и нанотехнологий, осваивается терагерцовый диапазон частот, гипер- и ультраспектральная селекция, что вместе с «традиционным» тепловидением расширяет границы и возможности оптико-электронного приборостроения.

Проанализированы основные направления исследований:

- формирователи тепловизионных изображений, в т. ч. с использованием многоспектральных фотоприемных устройств, позволяющие использовать законченные фотоприемные модули, формирующие на выходе тепловое изображение в стандартном телевизионном формате;

- твердотельная фотоэлектроника на основе твердых растворов  $A^3B^5$  для области спектра 1—2 и 1—3 мкм. Матрицы на основе этих соединений позволяют создать твердотельные аналоги вакуумных электронно-оптических преобразователей со спектральной чувствительностью, «продвинутой» в область максимума светимости ночного неба (~1,8 мкм), повышая контраст изображения и снижая влияние атмосферной дымки и т. д.;

- фотоэлектроника на основе матриц лавинных фотодиодов из KPT и InGaAs, позволяющая при работе в активно-импульсном режиме 3D-видения получать информацию не только о спектральной яркости изображения, но и информацию о расстоянии до него;

- ультрафиолетовая твердотельная фотоэлектроника, направленная на разработку матричных ФПУ, в том числе на основе твердых растворов AlN—GaN. Такие матрицы по своим пороговым характеристикам становятся конкурентоспособными с фотоэлектронными умножителями и электронно-оптическими преобразователями.

- многоспектральная (многочастотная) фотоэлектроника, повышающая вероятность обнаружения объектов, позволяющая преодолеть эффект нулевого радиационного контраста объекта, который приводит к принципиальной неразличимости однодиапазонным прибором;

- разработка полупроводниковых структур для создания охлаждаемых фотоприемников с повышенной рабочей температурой по сравнению с «азотной», направленная на оптимизацию их весогабаритных параметров и снижение потребляемой мощности;

- сверхпротяженные фотоприемные устройства на основе стыкуемых ВЗН-модулей (с числом каналов более 6000 и числом стадий накопления 10—12) и крупноформатных матриц (до 6000×6000 элементов) ближнего, среднего и дальнего ИК-диапазонов спектра.

Приведены современные достижения по каждому из перечисленных направлений. Доклады «Матричные фотоприёмные устройства формата 640×512 на основе гетероструктур CdHgTe, выращенных методом МЛЭ» (ИФП СО РАН) и «Flip-chip assembly for FPA» (SET, Франция) посвящены, в основном, конструкторско-технологическим аспектам создания крупноформатных матриц. В первом докладе рассмотрены матрицы заявленного формата для спектральных областей 3—5 и 8—10 мкм, выполненных по гибридной сборке. Приведены фотоэлектрические параметры матриц и параметры составных элементов.

Второй доклад полностью посвящен «Flip-chip» технологии создания гибридных матричных фотоприёмных устройств (МФПУ). Докладчик проанализировал технологию стыковки МФПУ. Рассмотрел пять различных вариантов стыковки, каждый из которых имеет свои положительные и отрицательные стороны. В заключение, ознакомил с техническими характеристиками оборудования для стыковки фирмы SAT.

В докладе «Перспективные направления развития приборов и технологий оптического, инфракрасного и миллиметрового диапазона в Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ» рассмотрены перспективные направления развития приборов и систем оптического, инфракрасного и миллиметрового диапазона. Разработана универсальная реконфигурируемая вычислительная система (УРВС) для обработки больших потоков данных, включая видеопотоки, отличающаяся низким энергопотреблением, малым габаритом и высоким вычислительным потенциалом. УРВС может одновременно принимать информацию с трех МФПУ, проводить обработку её по заданному алгоритму и выдавать в реальном времени цифровое изображение. УРВС может встраиваться в любую существующую или разрабатываемую систему, где требуется обрабатывать большие потоки данных, не снижая общей скорости работы системы. К УРВС могут быть подключены любые фотоприемники, например телевизионный, низкоуровневый и тепловизионный каналы. Выбор алгоритма обработки видеосигналов и их комплексирование (совмещение) осуществляется программным образом, не меняя аппаратной части системы.

На основе УРВС разработаны базовые электронные модули для оптико-электронных приборов как на основе охлаждаемых, так и неохлаждаемых приемников излучения. Анализ и обработка изображения происходит в реальном времени по всему кадру. Применяемый набор алгоритмов обработки изображения позволяет наблюдать сцены со слабыми контрастами и боль-

шим динамическим диапазоном, т. е. сцены с одновременным нахождением в кадре холодных и теплых объектов.

Использование УРВС позволяет существенно сократить в новых видеосистемах затраты на разработку электронных модулей. Данная вычислительная система используется для разработки тепловизионных каналов на базе отечественных охлаждаемых субматричных и матричных ФПУ для диапазонов 3—5 и 8—12 мкм.

Вторым важным направлением работы Филиала является создание и разработка методик тепловизионной диагностики в технологическом мониторинге и медицине.

Приведены примеры медицинского диагностического аппарата с разрешением не хуже 0,1 К и аппарата для мониторинга в миллиметровом диапазоне длин волн.

Доклад «Унифицированный ряд современных ФПУ разработки и производства ОАО «ЦНИИ «Электрон» для видимого, ультрафиолетового и ближнего инфракрасного диапазонов длин волн» посвящен разработке унифицированного ряда ФПУ на базе крупноформатных фоточувствительных приборов с переносом заряда (ФППЗ) для видимого, ультрафиолетового и ближнего инфракрасного диапазонов для систем дистанционного зондирования Земли и разработке унифицированного ряда модулей перспективных каналов ультрафиолетового диапазона спектра для оптико-электронных систем.

Эти разработки ведутся для наиболее перспективных направлений развития современной фотоэлектроники:

- ФПУ на базе крупноформатных утоненных ФППЗ, освещаемых со стороны подложки, с квантовой эффективностью в максимуме спектрального диапазона превышающей 80 %;

- ФПУ на базе сочленённых устройств ЭОП + ФППЗ с возможностью считывания однофотонных сигналов в диапазоне спектральной чувствительности, определяемом материалом фотокатода электронно-оптического преобразователя (ЭОП).

Разработанные ФПУ предназначены для применения в системах повышенной точности обнаружения малоразмерных объектов, а также для решения задач дистанционного зондирования Земли из космоса.

Разработаны два унифицированных гибридных солнечно-слепых фотоприёмных модуля (ЭОП + ФППЗ) для оптико-электронных многоспектральных и автономных систем, работающих в «солнечно-слепом» участке УФ-спектра излучения.

Приведены основные технические характеристики разработанных устройств.

### Матричные фотоприёмные устройства

Доклады этого направления в основном представлены ОАО «НПО «Орион» и ИФП СО РАН.

В докладе ИФП СО РАН «Высококачественные матрицы фотодиодов на основе КРТ форматов 640×512 и 320×256 на длины волн 3—5 и 8—12 мкм» представлены параметры МФПУ форматом 640×512 и 320×256 элементов, изготовленных по усовершенствованной технологии на основе ГЭС КРТ МЛЭ новой архитектуры, в которых реализованы решения, позволяющие уменьшить темновые токи и неоднородность параметров фотодиодов по площади МФПУ, значительно понизить количество дефектов, возникающих при гибридизации МФПУ, а также минимизировать эффект изменения рабочего смещения диодов.

Улучшение параметров достигнуто за счёт введения широкозонного высокопроводящего слоя *n*-типа, легированного индием для уменьшения последовательного сопротивления. ВАХ диодов однородны и лимитированы диффузионной компонентой тока вплоть до -400 мВ.

Произведен ряд изменений в технологии гибридной сборки, позволивших снизить количество не присоединенных ячеек и общее количество дефектных элементов матричного фотоприемника.

Приведены параметры разработанных МФПУ.

Линейчатое МФПУ из КРТ формата 288×4 на спектральную область до 12 мкм рассмотрено в работе Якушева М. В. и др. из ИФП СО РАН. Изучена возможность получения высокой обнаружительной способности для фотоприемных линеек формата 288×4 из *Is—n—p* ПК-фотодиодов КРТ с длинноволновой границей чувствительности по уровню 0,5 более 12,0 мкм при охлаждении не ниже 65 К.

Показано, что оптимизировав параметры базового слоя, можно получить линейчатые ВЗН ФП на основе вакансионного КРТ с длинноволновой границей чувствительности 12,5—13,0 мкм с высоким значением удельной обнаружительной способности при рабочих температурах не ниже 65 К.

При снижении рабочей температуры до 65 К, причем с одновременным уменьшением фоновой нагрузки и увеличением времени накопления,

$D_{\lambda \max}^*$  по недефектным каналам увеличивается вплоть до величины  $4,0 \times 10^{11}$  см Гц<sup>1/2</sup> Вт<sup>-1</sup>.

В докладе Болтаря К.О. и др. (ОАО «НПО «Орион») «Фотоэлектрические характеристики МФПУ на основе антимонида индия формата 640×512 с шагом 15 мкм» представлены характеристики МФПУ на основе InSb формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм, которое является развитием выпускаемого серийно МФПУ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм. Выбор шага

15 мкм для нового МФПУ позволил ускорить разработку его серийного производства, так как сохранился размер фоточувствительной области и мало изменился размер кристалла, что позволило сохранить всю ранее разработанную конструкцию МФПУ и тепловизионной аппаратуры, в которой оно используется.

Для реализации шага 15 мкм потребовалось разработать новую технологию создания высоких пластичных микроконтактов из In, для получения которых использовано анизотропное лучевое травление In-ионами Ag<sup>+</sup>. Эта технология разработана как для БИС считывания, так и для матричного фоточувствительного элемента.

При 8-канальном подключении получено функционирование МФПУ в режиме шума, ограниченного флуктуациями фона (BLIP-режим). Шум электроники при нулевом времени накопления составляет ~ 800 электронов. При сложении по квадратам шума в BLIP-режиме и шума электроники получено хорошее совпадение измеренного шума с теоретическим, ограниченным флуктуациями фонового излучения, что свидетельствует об отсутствии избыточных шумов.

Тема антимонида индия звучит и в докладе Патрашина А. И. из ОАО «НПО «Орион» «Исследование квантовой эффективности и темнового тока фотоприемных устройств на основе InSb». Предложен способ контроля величины квантовой эффективности и темнового тока каждого пикселя МФПУ, пригодный для определения количества дефектных элементов в матрице. Этот метод экспериментальных исследований однородности квантовой эффективности и темнового тока основан на расчете параметров ИК МФПУ, показавшего хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных.

Предложенный метод автоматизирован и позволяет провести измерения за достаточно короткий промежуток времени. Регистрируют величины сигналов всех пикселей, по крайней мере, при двух заданных температурах фона и двух заданных временах накопления, а по ним автоматически рассчитываются величины квантовых эффективностей и темновых токов всех фоточувствительных элементов.

Проблеме дефектности МФПУ из антимонида индия посвящены доклады Власова П. В. и Лопухина А. А. (ОАО «НПО «Орион»). Показано, что дефектность InSb-МФПУ обусловлена токами утечки фотодиодов, что связано не столько с обработкой, сколько с характеристиками самого слитка, из которого изготовлена матрица.

В качестве критерия уровня дефектности выбрано количество единичных дефектных элементов. Кластеры дефектных элементов не учитыва-

лись, так как причин появления дефектных кластеров достаточно много, и обычно они связаны со сбоями технологических операций изготовления МФЧЭ. Основная часть точечных дефектов потенциально связана с качеством исходного материала.

Показано, что уменьшение толщины фоточувствительного слоя не влияет на количество одноточечных дефектов.

Установлено, что основными причинами, вызывающими увеличение токов утечки фотодиодов, являются:

- плотность дислокаций исходных слитков антимиониды индия;
- качество обработки пластин после резки слитков;
- погрешности технологии изготовления МФЧЭ (как правило, образуются кластеры дефектов).

В докладе Балиева Д. Л. и др. (ОАО «НПО «Орион») «Исследование фотоэлектрических параметров фотоприемного модуля формата 320×256 на основе InGaAs» определены основные параметры модуля: среднее значение обнаружительной способности и вольтовой чувствительности, а также их дисперсия. Изучены ФЭМ с шагом 30 мкм ИК-диапазона 0,9—1,7 мкм формата 320×256 на основе эпитаксиальных гетероструктур InGaAs на подложке InP с использованием планарной и мезаструктуры.

Вишняков А. В. и др. (ИФП СО РАН) в своей работе «Определение длины диффузии носителей заряда в фоточувствительном слое матричных фотоприемников на основе HgCdTe с применением метода сканирования светового пятна при малых уровнях фототока» определяли объемную длину диффузии фотогенерированных носителей заряда в фоточувствительном слое HgCdTe *p*-типа проводимости матричных ФПУ средневолнового и длинноволнового диапазонов.

Они изучали форму распределения фотосигнала, регистрируемого при сканировании узкого продолговатого пятна засветки выбранным фотодиодом матрицы при последовательном уменьшении уровня регистрируемого фототока и показали, что метод сканирования светового пятна отдельным пикселем МФПУ в условиях малого уровня токов фотоприемной матрицы может быть использован как удобное средство определения длины диффузии фотогенерированных носителей заряда в фоточувствительном материале HgCdTe готового фотоприемника.

Особенности формирования  $n^+—n—p$ -структур в варизонных гетероэпитаксиальных слоях CdHgTe при имплантации ионов бора изучены в одноименной работе Талипова Н. Х. (РВСН им. Петра Великого) и Войцеховского А. В. (ТГУ) на основании результатов исследования процессов

формирования  $n^+—n—p$ -структур в ГЭС КРТ МЛЭ в зависимости от состава поверхности при ионной имплантации бора. Измерение пространственного профиля носителей заряда показало, что в ГЭС КРТ МЛЭ наблюдается формирование  $n^+—n—p$ -структуры, в которой на глубину слаболегированного  $n^-$ -слоя существенно влияют как состав поверхности, так и энергия, и доза ионов.

Показано, что состав поверхности ГЭС КРТ МЛЭ существенно влияет как на электрофизические параметры имплантированного слоя, так и на пространственное распределение радиационных дефектов донорного типа. Наблюдаемые экспериментальные данные объясняются тем, что с повышением толщины слаболегированного слоя в ГЭС КРТ МЛЭ концентрация смещенных междоузельных атомов ртути уменьшается и, следовательно, снижается концентрация электронов в приповерхностном  $n^+$ -слое. Кроме того, уменьшается количество диффундирующих в глубину кристалла донорных дефектов на основе междоузельной ртути и полная компенсация дефектов акцепторного типа (вакансий ртути) происходит в слое меньшей толщины, вследствие чего уменьшается глубина слаболегированного  $n^-$ -слоя, формируемого остаточным примесным фоном донорного типа.

В докладе Седнева М. В. и др. (ОАО «НПО «Орион») «Ионно-лучевое травление для формирования мезаструктур МФПУ» представлены результаты исследований профилей формируемых ионно-лучевым травлением полупроводниковых структур. Минимальные размеры областей незащищенных маской на двух исследованных структурах были: 2 и 5 мкм. Показано, что скорость травления падает с уменьшением ширины свободного от маски промежутка. Эффект отражения ионного пучка от вертикальных стенок, формируемых при травлении, может быть использован для изготовления субмикронных разделяющих мезаобластей.

Сочетание ионного и химического травления позволяет получать хорошие результаты при разработке технологии формирования мезаструктур. Разработанная технология формирования мезаструктур ионно-лучевым травлением обеспечивает изготовление фотодиодных матриц формата 320×256 с шагом 30 мкм на гетероэпитаксиальных слоях AlGaIn и InGaAs с параметрами на уровне зарубежных аналогов.

### Системы термостатирования

Проблемы термостатирования рассматривались на двух заседаниях.

Липин М. В. (ООО НТК «Криогенная техника») рассказал о разработках микрокриогенных систем (МКС) для охлаждения ФПУ. Предприятие

«НТК «Криогенная техника» в последнее время разработало несколько конструкций микрокриогенных систем, имеющих существенно лучшие массогабаритные характеристики по сравнению с разработанными ранее модульными МКС.

МКС изготавливаются только из отечественных материалов и комплектующих и позволяют криостатировать фоточувствительные элементы (ФЧЭ) фотоприемных устройств (ФПУ) 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.

Приведены результаты исследований и испытаний нескольких модификаций модульных МКС в различных условиях, в т. ч. в диапазонах температур криостатирования  $(65—80)$  К и  $(80—130)$  К.

В ОАО «Швабе-Фотосистемы» («Исследование возможности охлаждения фотоприёмных устройств с помощью нескольких газовых криогенных машин малой холодопроизводительности», авторы Карпов В. В., Козырев М. Е., Кузнецов Н. С.) выполнены комплексные расчетные и экспериментальные исследования технологических возможностей создания системы охлаждения из нескольких ГКМ малой холодопроизводительности для охлаждения одного многоспектрального ФПУ с теплопритоком более 2 Вт.

В результате исследований разработаны несколько вариантов конструкций ФПУ с системой охлаждения на основе отечественных ГКМ (на основе трех машин 1-го класса, на основе трех машин 2-го класса, на основе трех машин 3-го класса и на основе двух машин, а именно, одной 1-го класса и одной 3-го класса). Суть заключается в том, что холодные пальцы всех трех машин замкнуты на один растр, на котором расположен фоточувствительный модуль. При этом, используя машины различных классов, можно достигать разных значений суммарной холодопроизводительности системы.

Проводится экспериментальная отработка макетных образцов ФПУ, способных работать с предложенными вариантами составной системы охлаждения на основе отечественных ГКМ малой холодопроизводительности. В дальнейшем предполагается отработать алгоритмы управления подобными системами охлаждения при моделировании различных вариантов циклограмм функционирования ФПУ в приборах штатного применения.

В ИФП СО РАН разработан вакуумный криостатированный корпус (ВКК) для ИК ФП форма-

тов  $288 \times 4$ ,  $320 \times 256$ ,  $384 \times 288$ ,  $640 \times 512$ . («Вакуумные криостатированные корпуса для охлаждаемых инфракрасных приемников излучения», Брунёв Д. В. и др.). ВКК предназначены для работы с различными типами МКС охлаждения интегрального типа.

ВКК состоит из гильзы-держателя, герметично соединенной с корпусом ВКК, выполненным из нержавеющей стали. ИК ФП устанавливается на контактом растре, закрепленном на охлаждаемом наконечнике гильзы-держателя. В непосредственной близости от ИК ФП монтируются диодные термодатчики для поддержания рабочей температуры МКС. На контактом растре крепится охлаждаемая диафрагма с отрезающим фильтром, обеспечивающая засветку ИК ФП. Коэффициент отражения покрытия внутренней стороны диафрагмы не превышает 5 %.

Электрический интерфейс между ИК ФП и внешними электронными устройствами обеспечивается контактным узлом на основе металлокерамического 50-контактного кольцевого разъема. Высокий вакуум поддерживается при помощи газопоглотителей со встроенным нагревателем.

В конструкцию ВКК входят экраны, применяемые при необходимости снижения суммарного теплопритока к охлаждаемой зоне ВКК.

Цикл докладов Довгялло А. И. с сотр. (СГАУ, Самара) посвящен проблемам и перспективам применения термоакустических преобразователей в бортовых системах охлаждения; оценке эффективности использования баллонов с криогенной заправкой для бортовой дроссельной системы охлаждения; испытаниям и выбору оптимального состава экранно-вакуумной теплоизоляции для бортовой системы охлаждения ИК-аппаратуры; испытаниям бортового твердотельного аккумулятора холода и т. д.

В основе работы термоакустических преобразователей лежит сложный комплекс физических процессов, основанный на взаимодействии явлений акустической, теплофизической и газодинамической природы. Первой причиной, по которой термоакустические охладители могут вытеснить механические, является их высокий ресурс эксплуатации. Даже по самым скромным оценкам, ресурс таких установок превысит 100000 часов.

Несмотря на очевидное преимущество в ресурсе, такая установка обладает двумя существенными недостатками. Во-первых, использование термоакустического компрессора взамен электрического приведёт к повышению затрат энергии более, чем в два раза.

Во-вторых, такая система будет тяжелее механического аналога в 1,2—2 раза. Одним из способов преодоления энергетической проблемы яв-

ляется использование для нагрева горячего теплообменника не электрической энергии, а непосредственно солнечного излучения (концентратор лучистой энергии) или радиоизотопного источника тепла. Создание криогенных бортовых систем с температурным уровнем 20—40 К и приемлемым ресурсом представляется возможным при условии использования двухступенчатых термоакустических охладителей.

В следующем докладе проанализирована эффективность использования баллона с криогенной заправкой для бортовых дроссельных систем охлаждения. Существует возможность увеличить время работы таких систем за счет использования в их составе т. н. универсального газового баллона.

Объективно полезным и своевременным будет применение баллона с криогенной заправкой в составе систем охлаждения ИК-приемников излучения, так как он удовлетворяет существующим технологиям использования компримированных газов и криогенных жидкостей, увеличивает время функционирования системы, уменьшает время и затраты энергии на заправку.

Экранно-вакуумная тепловая изоляция (ЭВТИ) предназначена для защиты емкостей и трубопроводов с низкикипящими жидкостями типа азота, водорода, фтора и т. д., а также защиты других изделий от воздействия внешней окружающей среды с целью уменьшения теплообмена и сохранения заданного режима работы.

ЭВТИ состоит из большого числа слоев с низкой излучательной способностью, которые служат экранами, отражающими тепловое излучение. Эти экраны могут быть разделены теплоизоляционными прокладками из материалов с низкой теплопроводностью. В теплоизолирующем пространстве поддерживается вакуум порядка  $10^{-5}$ – $10^{-3}$  мм рт. ст. Механизм переноса тепла в ЭВТИ определяется собственной теплопроводностью слоев изоляции, контактной теплопроводностью, теплопроводностью газа (если ЭВТИ дегазирована не полностью) и излучением. На теплоперенос по твердому телу существенно влияет плотность укладки слоев, а также теплоперенос излучением. Это, в конечном итоге, и определяет, в целом, эффективную теплопроводность ЭВТИ. Для снижения теплопроводности по твердому телу следует применять прокладочные материалы с малой теплопроводностью и не допускать обжатия слоев теплоизоляции, приводящего к увеличению контактной теплопроводности. Прокладочный материал должен иметь минимальное газоотделение в вакууме, иметь достаточную механическую прочность вплоть до криогенных температур при малой плотности. Кроме того, он должен быть химически стойким и обладать хорошей газопроницаемостью. Проведе-

ны экспериментальные испытания ЭВТИ. Основные выводы можно сформулировать следующим образом.

1. Определен тип ЭВТИ, в наибольшей степени подходящий для изготовления теплоизоляционных чехлов ФПУ-ИК.

2. Изоляцию модуля фокального узла ФПУ-ИК рекомендуется изготавливать из двух коаксиально расположенных термоизоляционных чехлов с количеством экранов в каждом чехле не менее 50.

3. Между криогенным изолируемым элементом и теплоизоляционным чехлом рекомендуется обеспечить зазор 2—3 мм.

4. Максимально допустимое давление в вакуумной полости с теплоизоляционными чехлами не должно превышать  $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.

5. Для увеличения термического сопротивления термоизоляционных чехлов рекомендуется понижать температуру корпуса криостата.

И, наконец, что касается криоаккумуляторов.

Авторами разработан порядок расчёта и расчётные схемы аккумуляторов холода. Исходя из величин прогрева поверхности насадки рабочего аккумулятора в режиме «съёмка» объектов наблюдения с учётом суточной программы работы аппаратуры аккумулятора холода, для различных материалов насадки определены массогабаритные параметры рабочего и охранного аккумуляторов холода. Определены приоритетные материалы насадок аккумуляторов холода. Дана оценка энергопотреблению и массе ГКМ при тепловыделении фоточувствительного элемента 0,5—1,5 Вт на уровне температур 80 К.

Весьма полезным для разработчиков ОЭП, в которых используется охлаждение ФПУ, был доклад Полесского А. В. и др. (ОАО «НПО «Орион») «Исследование смещения матрицы чувствительных элементов криогенно-охлаждаемых фотоприемных устройств при криостатировании», в котором приведены результаты экспериментальных исследований по измерению величин смещений и наклонов охлаждающего пальца, обусловленных работой современных МКС интегрального типа, а также была проведена оценка влияния смещений и наклонов на качество работы ОЭС.

Обработка полученных результатов показала:

- наклон пальца МКС при захолаживании составляет порядка 2,5 угл. мин;
- при охлаждении поверхность ФЧЭ имеет радиус  $\sim 3730$  мм, а при комнатной температуре  $\sim 7600$  мм;
- центральный прогиб матрицы, вызываемый захолаживанием, составляет порядка 3,35 мкм.

На основании полученных результатов можно сделать выводы, что при разработке МКС для но-

вых поколений на основе охлаждаемых ФПУ следует особое внимание обратить на уменьшение вибрации охлаждающего пальца.

В заключение, Малинина О. И. (ООО «Лазерные компоненты») подробно рассказала об МКС, выпускаемых в Китае и поставляемых на российский рынок.

### Опико-электронные приборы

ИФП СО РАН совместно с ЗАО «ЭЛСИ» разработали прототип тепловизионной камеры (ТВК) на основе КРТ-МФПУ длинноволнового ИК-диапазона. («Тепловизионная камера на базе КРТ фотоприемника формата 320×256 элементов для спектрального диапазона 8—12 мкм»).

В состав тепловизионной камеры входят МФПУ, МКС, вакуумный криостатированный корпус (ВКК), блок спецэлектроники и ИК-объектив. Все перечисленные компоненты — отечественные.

В камере используется МФПУ формата 320×256 на основе слоев КРТ, выращенных методом МЛЭ. Шаг фоточувствительных элементов фотоприемника составляет 30×30 мкм. Основные характеристики камеры:

- спектральный диапазон, мкм, 8—12;
- среднее значение разности температур, эквивалентной шуму, мК, не более 60;
- количество дефектных элементов, %, не более 3;
- угол поля зрения, град, 15;
- частота кадров, Гц, 50;
- время выхода на рабочий температурный режим, мин., не более 7;
- масса камеры, кг, не более 2.

В работе «Конструкция охлаждаемой диафрагмы для матричных фотоприемных устройств среднего инфракрасного диапазона спектра» (Болтарь К. О. и др., ОАО «НПО «Орион») предложен способ борьбы с «паразитным излучением», которое обусловлено нагревом деталей МКС внутри вакуумного корпуса МФПУ на основе фотодиодов из антимонида индия.

Исследованы охлаждаемые диафрагмы разной конструкции и найдено, что наилучшие результаты дает цилиндрическая диафрагма.

В докладе Правдивцева А. В. (НИГ «Конструктивная кибернетика») «Экспериментальное исследование влияния характеристик оправ на внешний и внутренний паразитные потоки в диапазоне 8—12 мкм» показано, что использование оправ без покрытия ведёт к уменьшению их собственного теплового излучения. В некоторых случаях (например, появление ярких объектов рядом с полем зрения), возможно появление бликов, но данный эффект может быть уменьшен с использованием

бленд. Применение рифления на внутренней поверхности оправы с покрытием позволяет уменьшить внешний рассеянный поток за счет незначительного увеличения собственного паразитного потока. Использование рифления на внутренней поверхности оправы без покрытия увеличивает собственный поток оптической системы как из-за увеличения площади оправы, так и за счет обратного рассеяния теплового излучения из полости МФПУ.

### Технология опико-электронных приборов и фоточувствительных материалов

В докладе «МОС-гидридная эпитаксия узкозонных полупроводников  $A^3B^5$  для фотоэлектронных применений» (А. А. Мармалюк и др., ОАО «НИИ «Полюс») рассмотрена применимость МОС-гидридной эпитаксии в качестве метода формирования эпитаксиальных структур узкозонных полупроводников  $A^3B^5$  для фотоэлектроники.

Большая гибкость в выборе исходных материалов, широкий диапазон варьирования параметров роста, хорошая масштабируемость процесса роста для увеличения количества одновременно обрабатываемых пластин, снижение себестоимости продукции делают этот метод привлекательным для создания структур с перспективой промышленного освоения.

Рассмотрены особенности процесса получения InSb и InAs как на собственных подложках, так и на подложках из GaAs в условиях МОС-гидридной эпитаксии. Оптимизирован процесс роста эпитаксиальных слоев. Показано влияние предварительной подготовки подложек на качество осаждаемых слоев.

Изучены процессы гетероэпитаксии на широкозонных подложках GaAs, сильно различающихся по периоду кристаллической решетки с материалом слоя. Обсуждены перспективы использования полученных эпитаксиальных слоев для приборных применений.

Ростовые дефекты фоточувствительного материала оказывают заметное влияние на параметры фотоэлектронных приборов. Исследованию таких дефектов в эпитаксиальном КРТ посвящены работы «Ростовые дефекты КРТ МЛЭ, приводящие к образованию округлых скоплений дефектных пикселей в матричных фотоприемниках» из ИФП СО РАН и «Взаимодействие дефектов в легированном As МЛЭ CdHgTe» из НПП «Карат», Львов.

В первой из этих работ установлено, что ростовые дефекты типа «шип» являются причиной возникновения круговых скоплений дефектных пикселей МФПУ. Данные дефекты влияют как на количество дефектных элементов, так и на обнаружительную способность отдельных малых об-



ластей матрицы фотодетекторов на основе пленок КРТ МЛЭ. Следует также отметить, что наблюдаемая область материала с измененными параметрами может заметно превышать размер самого дефекта.

Оптимизация и контроль ростовых параметров пленок КРТ позволяет избежать возникновения подобных дефектов. Учет наличия шипов на поверхности пластин КРТ на стадии изготовления МФПУ также позволяет минимизировать их влияние на качество изготовленных устройств.

Во второй работе для исследования взаимодействия мышьяка с другими дефектами в процессе МЛЭ и выявления образованных вторичных дефектов и их комплексов использован разработанный авторами метод ионного травления (ИТ). Сильное пересыщение объема КРТ междуузельной ртутью при ИТ приводит к образованию вторичных донорных дефектов и комплексов междуузельная ртуть—первичные дефекты, которые нестабильны и распадаются после ИТ при хранении образцов при комнатной температуре. Исследование концентрации электронов непосредственно после ИТ (в процессе релаксации и после) позволило сделать новые выводы о взаимодействии As с другими дефектами при эпитаксии.

Полученные результаты убедительно показывают, что в процессе легирования As при МЛЭ может различным образом взаимодействовать с системой собственных дефектов, и, прежде всего, с избыточным Te (нейтральными наноконкомплексами Te), что определяется условиями роста и легирования, которые определяют соотношение потоков As<sub>4</sub> и As<sub>2</sub>. Наиболее эффективным методом легирования является легирование с крекингом при высоких температурах зоны крекинга  $T_{cr} \sim 100$  °С. При этом мышьяк в потоке присутствует преимущественно в виде димерных молекул As<sub>2</sub>. Молекулы As<sub>2</sub> эффективно взаимодействуют с избыточным Te, образуя донорные комплексы As<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, которые и определяют *n*-тип проводимости пленок. В процессе активационного отжига комплексы As<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> распадаются, высвободившийся мышьяк встраивается в подрешетку Te, где играет роль акцепторов, определяющих *p*-тип проводимости МЛЭ пленок. При этом также восстанавливается обычная концентрация нейтральных наноконкомплексов Te.

В совместной работе ИФ Микроструктур РАН (Н. Новгород) и ИФП СО РАН «Оптический мониторинг температуры в процессе подготовки и роста КРТ структур» проведено исследование метода тандемной низкокогерентной интерферометрии (НКТИ) для измерения температуры при росте КРТ структур на подложках из GaAs методом МЛЭ.

Метод НКТИ позволяет в реальном времени с высокой точностью измерять оптическую толщину плоскопараллельной пластины. Используя известную зависимость оптической толщины от температуры, можно определить величину изменений температуры подложки. Основные проблемы разработанной методики связаны с обработкой начальных этапов роста. Это связано с тем, что измеряемая оптическая толщина на начальном этапе изменяется не только за счет температуры, но и за счет изменения толщины растущей пленки. Для получения корректных величин температуры подложки необходимо уметь разделять данные эффекты. В ходе работы был предложен и апробирован оригинальный алгоритм обработки интерференционных сигналов, позволяющий заметно уменьшить влияние растущей пленки на результаты измерений.

Проведено сравнение показаний температуры системы НКТИ с данными эллипсометрии и получено хорошее совпадение. Таким образом, продемонстрирована возможность оптического мониторинга температуры подложки в условиях эпитаксиального роста КРТ-структур.

В работе Кеслера В. Г. и др. (ИФП СО РАН) «Фоточувствительные МДП-структуры со сверхтонким диэлектриком на КРТ» представлены результаты поисковых исследований, направленных на разработку новой технологии пассивации поверхности КРТ сверхтонкими диэлектрическими пленками (~3 нм). Исследования направлены на установление характера и степени нарушения стехиометрии приповерхностного слоя пленок КРТ при проведении необходимых технологических операций и на изучение электрофизических характеристик полученных структур.

Исследовано влияние вакуумных отжигов на химический состав поверхности КРТ.

Оценка обнаружительной способности по дробовому шуму темнового тока для структур состава  $x = 0,4$  (квантовый выход полагался равным 0,5) для лучших образцов с золотыми контактами соответствует величине  $\sim 5 \cdot 10^{12}$  см·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup> (при  $T = 78$  К) и  $\sim 1 \cdot 10^{11}$  см·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup> (при  $T = 173$  К). Для структур с платиновыми контактами обнаружительная способность при  $T = 78$  К составила  $4 \cdot 10^{11}$  см·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup>. Вместе с тем, имеет место невоспроизводимость результатов от процесса к процессу и значительная неоднородность параметров по площади тестовых структур.

Михайлов Н. Н. и др. (ИФП СО РАН) исследовали влияние защитного покрытия CdTe на электрофизические параметры эпитаксиальных пленок КРТ ( $x = 0,2$ ) и сделали следующие выводы.

1. При выращивании CdTe без остановки процесса наблюдается уменьшение концентрации но-

сителей в ГЭС КРТ МЛЭ. Рост слоя КРТ с выдержкой в камере роста ГЭС КРТ МЛЭ не изменяет параметров слоя.

2. Термический отжиг ГЭС КРТ МЛЭ со слоем CdTe не приводит к конверсии электронного в дырочный тип проводимости.

3. Слой CdTe создает барьер для диффузии ртути как в объем, так и из объема ГЭС КРТ МЛЭ.

### Проблемы обработки сигнала

Доклад И. И. Ли (ИФП СО РАН) «Устройства считывания многоэлементных ИК ФПУ третьего поколения» посвящен анализу состояния систем считывания информации с современных приёмников изображения. В итоге автор приходит к следующим выводам. Разработка современных устройств считывания, обеспечивающих обработку в режиме реального времени огромных массивов информации для ФПУ в видимом и ИК-диапазонах, формируется в самостоятельное научно-техническое направление. Успешное решение основных задач для ИК ФПУ третьего поколения будет определяться прогрессом в области кремниевых устройств считывания, и поэтому разработка кремниевых устройств считывания становится одним из основных приоритетов для всех фирм, занимающихся разработкой тепловизионных систем.

В работе Жегалова С. И. и Солякова В.Н. (ОАО «НПО «Орион») «Нейронная схема формирования изображения для ФПУ с микросканированием» рассмотрена схема коррекции неоднородности сигналов МФПУ и формирования изображения без назначения нулевого элемента с параллельным накоплением градиентов. Предлагаемая схема обработки аналогична нейронной сети.

Недостатком двумерного накопления с назначенным нулевым элементом является радиальная неоднородность выходного изображения. Установлено, что повтор двумерного накопления с нулевыми элементами в разных областях изображения и суммированием результатов улучшает качество изображения.

Предложенная схема коррекции неоднородности сигналов МФПУ с микросканированием с использованием параллельной обработки, аналогичной нейронной сети, позволяет заметно повысить качество коррекции и быстродействие схемы коррекции неоднородности.

В докладе В. Н. Солякова и др. (ОАО «НПО «Орион») «Компьютерная модель процесса регистрации точечных источников излучения многорядными ФПУ с режимом ВЗН» представлен вариант решения проблемы выбора оптимальных параметров многорядного ФПУ с режимом временной задержки и накопления (ВЗН-МФПУ),

предназначенного для регистрации точечных источников излучения. Предложена компьютерная модель процесса регистрации точечного источника с помощью ВЗН-МФПУ, позволяющая определить выходные сигналы изделия при различных входных воздействиях оптического излучения. Показано, что результаты компьютерного моделирования процесса регистрации точечного источника излучения с использованием ВЗН-МФПУ позволяют оптимизировать параметры фоточувствительного элемента для конкретных условий применения и определить пороговую чувствительность, модуляционную характеристику и другие характеристики аппаратуры применения.

В своих докладах Е. Б. Володин из ОАО «Ангстрем» («Схемотехника скоростного матричного фотоприёмника 1386НК01Н4 формата 256×256 с кадровой частотой 10 кГц» и «Схемно-конструктивные особенности сверхдлинных интегральных многорядных фотоприёмных линеек 5532ХИ1Н4, 5532ХИ2Н4 форматов 3072×128 и 6144×128 с ВЗН») изложил основные параметры новой интегральной схемы скоростного фотоприёмника с шагом пикселей 25 мкм:

- кадровая частота до 10 кГц, частота считывания строк до 1,25 МГц, частота считывания на аналоговых выходах до 40 МГц, на цифровых до 80 МГц, шаг ячеек 25 мкм, чувствительность ФПМ 7 В/люкс с., количество аналоговых выходов 16 (по 8 с каждой половины ФПМ), количество цифровых парафазных выходов 16 по 7 разрядов (по 8×7 с каждой половины ФПМ), уровень насыщения аналоговых сигналов на выходах и на входах АЦП до 3,2 В, разрядность АЦП — переключаемая 14 или 12, напряжения источников питания 5 В, для LVDS 0,8 В, общий ток потребления менее 200 мА.

На основе данной ИС возможно создание опции скоростного ИК-фотоприёмника путём сборки с ФЧЭ типа  $n$  на  $p$  через индиевые контакты.

Во втором докладе предложена новая схемная архитектура интегральных многорядных сверхдлинных фотоприёмных беззачерных линеек с шагом пикселей 12,5 мкм и количеством рядов ВЗН 128.

Основные параметры СБИС: частота считывания строк из ФПМ до 1,25 МГц, частота считывания строк из АОЗУ до 10 кГц, записи — до 1,25 МГц, частота считывания на выходах до 20 МГц, минимальное время прохождения элементом изображения фотодиода при сканировании 100 мкс, время накопления в ячейках АОЗУ при ВЗН до 12,8 мс, пространственная частота Найквиста  $80 \text{ мм}^{-1}$  для линейки прямой конфигурации (ВЗН по 128),  $160 \text{ мм}^{-1}$  — для зеркальной линейки (ВЗН по 64), шаг ячеек 12,5 мкм, количество аналоговых выходов 2 (по одному с левой и правой половин каждо-

го модуля 768:1), количество цифровых выходов 2 по 7 разрядов (по одному порту с левой и правой половин каждого модуля 768:7), размах ступенчатого эталонного напряжения АЦП 3,2 В, разрядность АЦП — 14, (7 при коррекции неоднородности смещений).

ОАО «НПП «Пульсар» представило работу «Столбцевой АЦП последовательного приближения для КМОП матричных фотоприемников», в которой описывается решение задачи проектирования и тестирования сложнофункциональных блоков АЦП, предназначенных для многократного использования в составе семейств матриц КМОП-приемников видимого излучения. Главными факторами, определившими полученные схемотехнические и топологические решения были следующие: реализация не менее двенадцати разрядов преобразования с производительностью 77000 оп./с при условии минимизации площади, занимаемой узлами АЦП и потребляемой мощности. В работе предпринята попытка создания АЦП, пригодного для многоканального применения, в котором реализована возможность масштабирования и мультиплицирования.

Особенность предложенного варианта АЦП заключается в том, что схема ЦАП выполнена с тремя подблоками взвешивающих конденсаторов, причем на каждый подблок подаются различные опорные напряжения, значения которых соответствует определенному диапазону разрядности преобразования. В многоканальном исполнении опорные напряжения могут задаваться одновременно для всех каналов.

В итоге, в полном объеме получены проектные решения и GDS-файлы топологии столбцевых АЦП, предназначенных для использования в качестве СФ-блоков КМОП-фотоматриц. По сравнению со стандартным решением на взвешенных конденсаторах, предложенное решение позволяет уменьшить занимаемую площадь на кристалле, приблизительно, в 300 раз.

### Проблемы метрологии

В докладах Шкуркина А. П. и др. (ФГБУ «ГНМЦ», Мытищи) «Метрологическое обеспечение оптико-электронных приборов, работающих по некогерентному оптическому излучению» и «Особенности определения точностных характеристик лабораторных дифференциальных инфракрасных коллиматорных стендов, предназначенных для испытаний тепловизионных наблюдательных приборов» представлены результаты деятельности по метрологическому обеспечению оптико-электронных приборов (ОЭП).

В первом докладе по метрологическому обеспечению ОЭП, работающих в ультрафиолетовой,

видимой и инфракрасной областях спектра, включающему применение существующей эталонной аппаратуры, аппаратно-методические решения, позволяющие расширить ее возможности, а также предложения по модернизации и развитию в части измерений:

- энергетической яркости и радиационной температуры;
- разности радиационных температур и разности энергетических яркостей;
- световых и энергетических величин в видимой области спектра;
- энергетических величин в ультрафиолетовой области спектра.

Во втором докладе представлена разработанная авторами на основе действующей схемы метрологического обеспечения ОЭП методика аттестации дифференциальных инфракрасных коллиматорных стендов (ДИКС) по разности радиационных температур (РРТ), воспроизводимой на выходе инфракрасных коллиматоров, с требуемой погрешностью методом прямых измерений при помощи специального эталона-переносчика для температуры окружающей среды ( $20 \pm 2$ ) °С. Приведены результаты аттестации, которые показали, что данная методика позволила впервые свести результаты воспроизведения РРТ типовых ДИКС в пределах допусковых отклонений.

Проведено исследование фотоэлектрической связи ультрафиолетового МФПУ формата 320×256 (Хамидуллин К. А. и др., ОАО «НПО «Орион») с шагом 20 и 30 мкм. Обнаружены положительные и отрицательные коэффициенты фотоэлектрической связи.

Анализ показал, что отрицательная величина коэффициента фотоэлектрической связи не является ошибкой эксперимента. Это явление представляет интерес и требует дальнейшего обсуждения. По мнению авторов, его можно объяснить взаимодействием ультрафиолетового излучения с мультиплексором либо падением напряжения в подложке в области облученного фоточувствительного элемента, вызывающим снижение уровня темного «пьедестала» у соседних фоточувствительных элементов.

Чистов О. В. и др. (ОАО «НПО «Геофизика-НВ») разработали автоматизированную установку измерения отношения сигнал—шум ЭОП на основе методов цифровой обработки изображения. В установке в качестве приемника изображения с ЭОП используется не яркомер, а цифровая ТВ-камера, позволяющая легко автоматизировать процесс фокусировки на экран ЭОП и обеспечить высокую повторяемость результатов. Использование цифровой ТВ-камеры дает следующие преимущества:

- возможность измерения отношения сигнал-шум в различных полосах частот без изменения конфигурации установки;

- возможность измерения отношения сигнал-шум с площадок различного диаметра без существенного изменения конфигурации установки.

### Фотоприёмные модули и фотоприёмные устройства

Кузнецов П. А. и Мошев И.С. (ОАО «НПО «Орион») в своём докладе «Фотоприёмные модули (ФПМ) с режимом ВЗН для мониторинга земной поверхности в ИК-диапазоне» сообщают о разработке ФПМ двух типов.

ФПМ 1-го типа содержит шесть многорядных линеек КРТ фотодиодов формата  $576 \times 4$  с шагом поперек сканирования 28 мкм. Перекрываемый спектральный диапазон составляет 3—12,5 мкм при рабочей температуре 65 К.

Рассмотрен следующий вариант распределения спектральных каналов: в диапазоне 3—5 мкм — 1 канал (СВ); в диапазоне 8—11 мкм — 4 канала (ДВ1); в диапазоне 11—12,5 мкм — 1 канал (ДВ2). Расчетное среднее значение удельной обнаружительной способности  $D^*$  в максимуме спектральной чувствительности по недефектным ФЧЭ (с учетом режима ВЗН) при угле поля зрения  $21^\circ$ , температуре объекта съемки 300 К и температуре внеапертурного фона не выше 180 К должно быть не менее  $1 \times 10^{11} \text{ Гц}^{1/2} \cdot \text{см} \cdot \text{Вт}^{-1}$  — для ДВ1,  $7 \times 10^{10} \text{ Гц}^{1/2} \cdot \text{см} \cdot \text{Вт}^{-1}$  — для ДВ2 и  $7 \times 10^{11} \text{ Гц}^{1/2} \cdot \text{см} \cdot \text{Вт}^{-1}$  — для СВ. Вывод фотосигналов производится шестью мультиплексорами, интегрированными в едином кристалле БИС считывания. Мультиплексирование производится на 24 информационных выхода, по 4 выхода  $576 \times 1$  на каждый спектральный канал. Такая организация позволяет производить внешнее (цифровое) запоминание и суммирование фотосигналов по четырем элементам, т. е. работать в режиме ВЗН.

ФПМ 2-го типа формата  $1024 \times 10$  предназначен для регистрации сигналов в спектральном диапазоне 1—3 мкм (КРТ-ФД с  $x = 0,39—0,41$ ). Среднее значение  $D^*$  в максимуме спектральной чувствительности по недефектным ФЧЭ составляет  $5 \times 10^{12} \text{ Гц}^{1/2} \cdot \text{см} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Отличительными особенностями этого ФПМ являются:

- осуществление режима ВЗН по 10 элементам в аналоговом виде, на кристалле БИС считывания с шагом каналов 15 мкм;

- безазорная топология фоточувствительных элементов;

- кристалл ФЧЭ располагается асимметрично относительно кристалла БИС считывания, что дает возможность каскадирования ФПМ при построении сверхмногоканального ФПУ.

В ОАО ЦНИИ «Электрон» ведутся работы по созданию гибридных солнечно-слепых телевизионных приборов на основе матрицы с числом элементов  $768 \times 580$ , размер чувствительного элемента  $17 \times 34$  мкм, размер изображения на фотокатоде  $13,1 \times 9,8$  мм. Основные проблемы были связаны с конструкцией узлов гибридного прибора, технологией утонения и очувствления электронно-чувствительного прибора с переносом заряда, вакуумной обработкой прибора и получением высокой чувствительности фотокатода. В настоящее время изготовлены экспериментальные образцы для ультрафиолетового диапазона с TeCs фотокатодом.

Здесь же разрабатываются модульные широкоформатные телевизионные фотоэлектронные приборы с двухкаскадным докоммутиационным усилением, предназначенные для модернизации и создания новых оптико-электронных систем поиска, наблюдения объектов и их измерения на сверхбольших расстояниях (Плахов С. А. и др., «Широкоформатный телевизионный фотоэлектронный прибор систем ночного видения»).

Исследованы три модульных образца широкоформатных фотоэлектронных приборов (ФЭП). Первый ФЭП на входе имеет фокус диаметром 40 мм, специализированный ЭОП  $\text{II}^+$  поколения с многощелочным низкоомным фотокатодом, обеспечивающий интегральную чувствительность 500 мкА/лм и специально разработанная ФППЗ-матрица. Многощелочные фотокатоды в ЭОПе  $\text{II}^+$  поколения обеспечивают способность стробирования фотоэлектронного прибора с длительностью строба до 10 нс.

Во втором и третьем образцах использовано каскадно-докоммутиационное усиление на базе двух типовых многощелочных ЭОПов II поколения с общим усилением  $10^5—10^6$ , что обеспечивает получение высокой пороговой чувствительности  $10^{-6}—10^{-7}$  лк, широкого регулируемого светового диапазона  $10^4 \text{ м}10^5$ , умеренной световой нагрузки на ЭОПы при длительной эксплуатации.

Прямое оптическое сочленение высококачественного фоконна, двух ЭОПов и матрицы ФППЗ через волоконно-оптические пластины дает оптимальное согласование по коэффициенту пропускания светового излучения и разрешению. Незначительное увеличение темнового фона фотоэлектронного прибора в целом на качестве изображения практически не сказывается.

Одноэлементные и многоэлементные детекторы УФ-излучения на основе широкозонных (алмаз и карбид кремния) материалов изучены в докладе представителей ООО «ПТЦ УралАлмазИнвест» Шепелева В. А. и др. Рассмотрены практические возможности создания детекторов УФ-излучения на основе алмаза и SiC. Отмечена привлекательность использования SiC, связанная с совместимостью процессов создания слоев SiC с кремниевы-

ми технологиями. Представлены спектральные характеристики алмазных УФ ФП.

Интересные доклады подготовлены сотрудниками ФТИ РАН Андреевым И. А. («Фотоэлектрические свойства InAs/InAsSbP/InAs/InAsSbP гетерофотодиодов с диаметрами активной области 0,1—2,0 мм для спектрального диапазона 1,5 м 4,0 мкм») и Матвеевым Б. А. («Фотодиоды на основе одиночных гетероструктур с активными областями из InAs и InAsSb»).

В первом из них сообщается о последних достижениях в разработке  $p-i-n$ -ФД на основе гетероструктур InAs/InAsSbP/InAs/InAsSbP, изготовленных как методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), так и методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ). Разработан ряд фотодиодов с диаметрами фоточувствительной площадки от 0,1 до 2,0 мм.

Представлены основные параметры, достигнутые на высокоэффективных быстродействующих InAs/InAsSbP фотодиодах, выращенных методом МОГФЭ с широкозонным «окном» из InAsSbP (содержание фосфора  $> 0,5$ ) для спектрального диапазона 2,0—3,6 мкм, так и выращенных методом ЖФЭ с широкозонным «окном» из InAsSbP (содержание фосфора  $> 0,3$ ) для спектрального диапазона 2,5—3,6 мкм.

Во втором докладе приводятся результаты исследований ФД на основе одиночных гетероструктур, выращенных на сильнолегированной подложке  $n^+$ -InAs и содержащих два эпитаксиальных слоя  $p$ -InAsSbP и  $n$ -InAs или  $n$ -InAsSb, чувствительных, соответственно, на длинах волн 3 и 4 мкм.

Фотодиоды на основе одиночной гетероструктуры  $p$ -InAsSbP/ $n$ -InAs с пиком чувствительности в области 2,8—3,4 мкм при низких температурах имели смешанный характер токопрохождения, связанный с рекомбинацией в квазинейтральных областях и генерацией и рекомбинацией в слое объемного заряда. При температуре жидкого азота и в области средних температур (150—200 К) ФД обладали характеристиками, превосходящими известные аналоги на основе арсенида индия. При температуре  $T = 180$  К значение  $D^*$  в максимуме составляло  $1,4 \cdot 10^{12}$  см<sup>2</sup>·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>1/2</sup>. При комнатной и повышенных температурах прохождение тока в ФД на основе InAs и InAsSb определялось диффузионным механизмом. В области температур -20 — +80 °С продемонстрирована работа двухволнового модуля на основе InAs и InAsSb на длинах волн 3 и 4 мкм.

### Новые приборы и явления

Большой интерес вызвал доклад Яковлева Ю. П. и др. (ФТИ РАН) «Электролюминесцентные свой-

ства дисковых лазеров со сдвоенными резонаторами на основе квантово-размерной наногетероструктуры GaInAsSb/AlGaAsSb ( $\lambda \sim 2,2$ — $2,4$  мкм).

Созданы WGM-лазеры (работающие на модах «шепчущей галереи») со сдвоенными дисковыми резонаторами, соединенными переемычкой, и изучены электролюминесцентные свойства таких лазеров.

Лазерная структура выращена методом МЛЭ на подложке GaSb (100)  $n$ -типа. Активная область толщиной 856 нм состояла из двух квантовых ям состава Ga<sub>0,65</sub>In<sub>0,35</sub>As<sub>0,11</sub>Sb<sub>0,89</sub> толщиной 13 нм, разъемных слоев Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As<sub>0,02</sub>Sb<sub>0,98</sub> толщиной 30 нм. Волноводные слои из Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As<sub>0,02</sub>Sb<sub>0,98</sub>, имели толщину 400 нм. Активная область преднамеренно не легировалась. Волновод был ограничен широкозонными слоями  $p$  (Be)- и  $n$  (Te)-Al<sub>0,9</sub>Ga<sub>0,1</sub>As<sub>0,08</sub>Sb<sub>0,92</sub> толщиной 1,0 мкм. Широкозонные слои  $n$ - и  $p$ -типа легировались до концентрации носителей заряда  $2 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. С внешней стороны к широкозонным слоям примыкали варизонные слои AlGaAsSb для улучшения инжекции носителей заряда в активную область. В качестве верхнего контактного слоя структуры выращивался слой  $p$ -GaSb толщиной 475 нм, легированный до  $5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Измерялись спектры излучения лазеров при комнатной температуре в интервале токов от 0,1 до 0,4 А с заполнением 0,5 на частоте около 500 Гц.

Показано, что лазерное излучение может переходить из одного диска в другой по соединяющей их переемычке. В исследованных лазерах почти все излучение сосредоточено в одной спектральной линии. Обнаружено сильное сужение диаграммы направленности лазерного излучения вблизи плоскости, разделяющей резонаторы.

В докладах В. А. Холоднова и др. (ОАО «НПО «Орион», ИРЭ РАН) «Принципы аналитической системы физического проектирования лавинных гетерофотодиодов (ЛГФД) с разделенными областями поглощения и умножения (РОПУ)» и «Характер зависимости пороговой энергии ударной ионизации в лавинных фотодиодах от взаимного импульсного расположения зоны проводимости и валентной зоны» рассмотрены основные принципы физического проектирования ЛГФД с РОПУ и вопрос о характере зависимости пороговой энергии ударной генерации электронно-дырочных пар от степени прямозонности полупроводника.

Естественно, что при физическом проектировании ЛГФД с РОПУ, как и лавинного фотодиода любого другого типа, стремятся, прежде всего, обеспечить как можно более высокие показатели трех основных характеристик фотоприемника, а именно, чувствительности, быстродействия и мощности эквивалентной шуму.

Доклады А. Г. Рокаха и др. (ГУ, Саратов) «О взаимосвязи плазменного резонанса, экзоэлектронной фотоэмиссии и вторично-ионного фотоэффекта в полупроводниках» и «Средний инфракрасный спектр пленок CdS-PbS: возможность плазменного резонанса» посвящены мало изученным явлениям экзоэлектронной фотоэмиссии, ионному фотоэффекту и возможного влияния плазменного резонанса на эти явления в плёнках сульфида кадмия-свинца.

Под понятием «ионный (вторично-ионный) фотоэффект» авторы подразумевают подавление или усиление с помощью излучения экзоионной эмиссии и предлагают дальнейшее расширение понятия «фотоэффект» в среднем ИК-диапазоне путем включения в арсенал актуальных процессов явления плазменного резонанса в полупроводниках.

Авторы считают, что гетерофазный пленочный полупроводник типа CdS—PbS может служить модельным веществом для экспериментального исследования влияния плазменного резонанса на выход электронов из полупроводникового фотокатода.

Поскольку плазменный резонанс в полупроводниках имеет место в средней ИК-области спектра при комнатной температуре, индуцированная им эмиссия электронов в вакуум может наблюдаться без специального охлаждения.

Причины появления плазменного резонанса в широкозонном полупроводнике типа CdS могут быть связаны с нестехиометрическим избытком

кадмия, который обычно ответственен за увеличение проводимости в этом полупроводниковом соединении. Роль добавки узкозонного полупроводника ещё предстоит оценить.

### Заключение

Заканчивая обзор докладов 23-й Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, необходимо отметить высокий уровень результатов ведущих фирм, и можно утверждать, что представленные на конференцию доклады охватывают основной круг проблем, стоящих перед этой быстроразвивающейся отраслью науки и техники.

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

*Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9*

### Литература

1. Труды XXIII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М.: ОАО «НПО «Орион», 2014. ISBN 978-5-89564-086-9

## Lines of modern photoelectronics development (review on proceedings of the XXIII International conference on photoelectronics and night vision devices)

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

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

*Received August 11, 2014*

*Analysis of the subject matter and reports of the XXIII International conference on photoelectronics and night vision devices has been performed in this article. The conference has been carried out in Moscow in May 28—30, 2014.*

PACS: 85.60.-q

*Keywords:* photoelectronics, conference, exhibition, report, photodetector, night vision device.

### References

1. *Proceedings of the XXIII International Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices* (NPO Orion, Moscow, May 28—30, 2014).