

## Современные тенденции развития фотоэлектроники

(Обзор материалов XXVI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения)

И. Д. Бурлаков, С. А. Кузнецов, А. Ю. Яковлев

**25–27 мая 2022 года в Государственном научном центре Российской Федерации Акционерном обществе «НПО «Орион» состоялась XXVI Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения.**

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

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-351-380

### Введение

XXVI Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения состоялась при поддержке Министерства промышленности и торговли Российской Федерации, Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, ГК «Ростех», Холдинга АО «Швабе», Российского фонда фундаментальных исследований, Русского оптического общества, Оптического общества им. Д. С. Рождественского.

В работе конференции приняли участие более 250 ученых и специалистов из 61 организации сферы науки, производства и образования России, Белоруссии, Сербии и Сирии, которые представили на обсуждение 135 устных докладов.

Открывая конференцию генеральный директор ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» Сергей Алексеевич Кузнецов отметил важность проводимого мероприятия, приуроченного к 75-летию ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», основной задачей которого является всестороннее развитие физики и технологий фотоприемных устройств, инфракрасной техники и оптоэлектроники.

С приветственным словом к участникам и гостям конференции обратилась заместитель генерального директора Холдинга АО «Швабе» Ольга Федоровна Малашкина. Она пожелала участникам успешной и плодотворной работы.

Пленарная сессия была посвящена современному состоянию и перспективам развития фотоэлектроники, обсуждению наиболее актуальных направлений и перспектив её развития. Свои взгляды изложили ученые и специалисты ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ», АО «ЦНИИ «Электрон», ФГУП «ВНИИФИ», Московского физико-технического института (национальный исследовательский университет), Московского технологического университета (МИРЭА), ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Российского института радионавигации и времени, Института автоматизации и электрометрии СО РАН, ОАО «НПО «Геофизика-НВ», Новосибирского государственного университета, Томского политехнического университета, МГТУ им. Баумана, Института физики микроструктур РАН, ПАО «Ростовский оптико-механический завод», АО «ОКБ «Астрон» и ряда других организаций и предприятий.

Секционные заседания работали по следующим тематическим направлениям:

- Техника тепловидения;
- Материалы фотосенсорики;
- Системы и методы измерений. Спектроскопия. Лазерные системы;
- Твердотельная фотосенсорика. Приборы ночного видения.

**Бурлаков Игорь Дмитриевич**<sup>1,2</sup>, зам. ген. директора по инновациям и науке, д.т.н., профессор.

**Кузнецов Сергей Алексеевич**<sup>1</sup>, ген. директор.

**Яковлев Александр Юрьевич**<sup>1</sup>, начальник управления.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ig.ru

<sup>2</sup> МИРЭА – Российский технологический университет.

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 28 августа 2022 г.

© Бурлаков И. Д., Кузнецов С. А., Яковлев А. Ю., 2022

В холлах конференц-зала был представлен 71 стендовый доклад по данным тематикам. В устных и стендовых докладах была представлена широкая палитра научно-технических исследований в современной опто- и фотоэлектронике и результатов разработок фотоприемных устройств.

### Современное состояние и перспективы развития фотоэлектроники

В пленарном докладе заместителя генерального директора по инновациям и науке АО «НПО «Орион», д.т.н. **Бурлакова И. Д.** «Основные направления развития и результаты разработки фотоприемных устройств в ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» отмечено, что в настоящее время АО «НПО «Орион» вместе с АО «Московский завод «Сапфир» играют ключевую роль в разработках и поставках современных фотоприемников и фотоприемных устройств для более чем 170 предприятий различных отраслей отечественной промышленности.

Решена одна из важнейших научно-технических задач по созданию отечественного матричного фотоприемного устройства (МФПУ) средне-волнового ИК-диапазона. Впервые в Российской Федерации разработана серийная технология, организована и введена в эксплуатацию уникальная технологическая линия и освоен промышленный выпуск полноформатных МФПУ второго поколения для важнейших оборонных систем и комплексов.



Фотоэлектронные изделия второго поколения

При этом, магистральным путем повышения качества МФПУ на основе антимонида индия и производительности при их производстве является применение эпитаксиальных структур  $\text{InSb-on-n+InSb}$ .

Разработана серийно-пригодная технология изготовления квантоворазмерных фоточувствительных структур для области спектра 8–10 мкм, обеспечившая создание отечественных МФПУ второго поколения с характеристиками, не уступающими зарубежным образцам и импортозамещение в производстве тепловизионной аппарату-

ры. Приведены основные характеристики МФПУ для длинноволновой области спектра на основе структур с квантовыми ямами  $\text{AlAs-AlGaAs}$ , изготовленными молекулярно-лучевой эпитаксией (МЛЭ).

Впервые в Российской Федерации разработана серийная технология изготовления многоспектрального комплекта (7 диапазонов) многорядных ВЗН-фотоприемников для дистанционного зондирования поверхности земли и атмосферы из космоса. Это обеспечивает работу гидрометеорологической аппаратуры на борту космических аппаратов серий «ЭЛЕКТРО-Л», «АРКТИКА-М», «КАНОПУС-В-ИК».



Многорядные охлаждаемые МФПУ на основе КРТ

Отмечено, что первоочередными мероприятиями являются дальнейшие исследования и разработки охлаждаемых матричных фотоприемных устройств нового поколения на основе  $\text{InSb}$ ,  $\text{CdHgTe}$  и  $\text{InGaAs}$  для областей спектра 0,9–1,7, 3–5 и 8–12 мкм, в том числе с форматом  $640 \times 512$  элементов и шагом 15 мкм и с форматом  $1280 \times 1024$  мкм с шагом 10–12 мкм. Значительное внимание уделяется разработкам высокоэффективных микрокриогенных систем (МКС), в том числе для «высокотемпературных» МФПУ. Отечественные МКС собственного производства обеспечивают импортнезависимость изделий.

Также рассмотрены результаты и перспективы развития ряда новых направлений в современной опто- и фотоэлектронике: возможности применения нелинейных оптических явлений в структурах на основе наночастиц топологических изоляторов типа теллурида висмута, использование квазиульмерных и квазидвумерных структур в архитектурах полупроводниковых фотосенсоров, направления использования матричных ИК-камер коротковолнового диапазона производства ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», в том числе для анализа художественных произведений искусства.



*Использование матричных короткокопных камер для анализа художественных произведений искусства*

Основными тенденциями развития технологической фотосенсорики ИК-диапазона являются:

- разработка и совершенствование методами гетероэпитаксиальной инженерии исходных полупроводниковых фоточувствительных материалов и структур для:

- устойчивого выпуска МФПУ всех спектральных диапазонов;

- создания двух- и многоспектральных МФПУ, а также МФПУ для гиперспектральных систем;

- создания МФПУ с различными дополнительными функциональными возможностями, в том числе МФПУ с лавинным усилением, и МФПУ сверхдлинноволнового диапазона (>14 мкм);

- создание матриц фоточувствительных элементов с уменьшенным шагом элементов вплоть до 5 мкм, обеспечивающих формирование мегапиксельных матриц с низкой дефектностью и малой взаимосвязью, а также их гибридизацию с кремниевыми мультиплексорами;

- создание кремниевых БИС считывания для криогенных температур с цифровой предобработкой, малым шагом и числом входных ячеек  $10^6$ – $10^7$ ;

- разработка типоряда микрокриогенных систем охлаждения, в том числе на промежуточные температуры для «высокотемпературных» МФПУ;

- развитие новых принципов и материалов для регистрации ИК-излучения, включая коллоидные квантовые точки, графен, другие 2D-структуры и т. п.

Состояние и перспективы развития охлаждаемых фотоприемных устройств на основе сложных гетероструктур в своем докладе представил д.ф.-м.н. **Якушев М. В.**, заместитель директора по научной работе Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН.

В частности, отмечено, что уровень современных оптико-электронных систем определяется развитием технологий МФПУ новых поколений на все спектральные диапазоны оптического излуче-

ния, в первую очередь, инфракрасного. Новые поколения МФПУ, особенно для инфракрасных систем 3-го поколения, усиленно разрабатываются в последние годы многими фирмами США, Франции, Англии, Китая и ряда других стран.

Можно выделить две основные тенденции развития инфракрасных фотоприемных устройств:

- Увеличение формата фотоприемника и уменьшение размера пикселя;

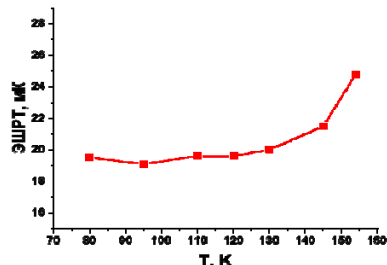
- Снижение массогабаритных характеристик и стоимости ИК ФПУ.

Увеличение формата фотоприемника и уменьшение размера пикселя является всеобщим трендом практически для всех мировых разработчиков и производителей ИК МФПУ. Увеличение формата приводит к значительному росту дальности распознавания объектов.

Уменьшение размера пикселя позволяет увеличивать формат, практически, без значительного увеличения геометрических размеров ИК МФПУ. В результате не меняются требования к латеральной однородности состава фоточувствительного материала и к оптике тепловизионного канала. Кроме того, МФПУ с меньшим размером пикселя (при сохранении формата) характеризуются меньшей охлаждаемой массой, в результате чего снижается нагрузка на микрокриогенную систему, снижая энергопотребление и повышая её ресурс.

Основным сдерживающим фактором широкого применения охлаждаемых МФПУ являются их относительно большие размеры, вес и энергопотребление, вызванные необходимостью охлаждения фоточувствительных матриц до температуры жидкого азота (78 К). В последнее время интенсивно развиваются МФПУ, работающие при повышенных температурах, так называемые HOT (High Operating Temperature) детекторы. Повышение рабочей температуры приводит к уменьшению массогабаритных характеристик ИК МФПУ и потребляемой мощности без изменения чувствительности, так называемые SWaP технологии (Size, Weight and Power). Повышение рабочей

температуры от 80 до 150 К позволяет снизить в 2 раза вес МФПУ и в 3 раза энергопотребление. Такие МФПУ значительно расширяют области применения вплоть до использования в носимых системах, в прицелах для стрелкового оружия, на малых беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) и т. д.



Температурная зависимость ЭШРТ и формирование изображения (по материалам зарубежной печати)

Для снижения величины темнового тока фотодиодов в МФПУ и, соответственно, повышения рабочей температуры охлаждения, в настоящее время проводятся исследования в нескольких направлениях:

- получение *p*-на-*n* фотодиодов с использованием многослойных гетероструктур КРТ, легированных внешними примесями, выращиваемых методом МЛЭ;
- применение вместо ионно-имплантированных объемных кристаллов InSb *p-n* фотодиодов модулированно-легированных гетероэпитаксиальных структур на основе InAlSb, InSbAs с использованием в активной части диода барьерных слоев (так называемые ХВп-диоды).

Другим по значимости фактором является высокая стоимость изготовления охлаждаемых ИК МФПУ. В связи с этим в последнее время значительные усилия направлены на разработку процессов выращивания фоточувствительных структур на «альтернативных подложках» большого диаметра. Компания Raytheon Vision Systems (США), например, сообщает о выращивании многослойных гетероструктур КРТ на подложках из кремния большого диаметра до 200 мм. Использование гетероструктур КРТ, выращенных на кремнии, кардинально решает проблему согласования коэффициентов термического расширения фоточувствительного элемента и кремниевой интегральной схемы считывания и предварительной обработки сигнала (мультиплексора), что, в свою очередь, упрощает (удешевляет) производство

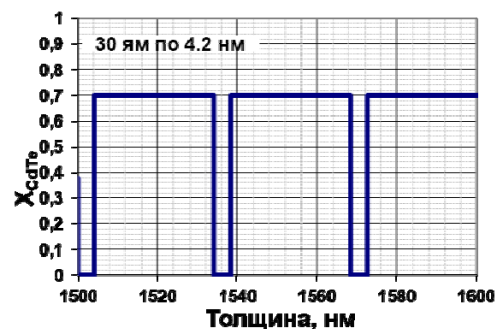
МФПУ и существенным образом увеличивает их ресурс.

Более радикальным способом снижения стоимости ИК МФП является отказ от дорогих эпитаксиальных процессов и гибридной сборки. За рубежом в настоящее время ведутся интенсивные исследования в области ИК МФПУ на коллоидных квантовых точках. Практически важной особенностью квантовых точек является способность существовать в виде золь (растворов). Это позволяет легко получать покрытия из пленок квантовых точек дешевыми методами, например, spin-coating, или наносить квантовые точки с помощью струйной печати на любые поверхности. Все эти технологии позволяют избежать при создании устройств на основе квантовых точек дорогих вакуумных технологий, традиционных для микроэлектронной техники и наносить фоточувствительные слои непосредственно на мультиплексор.

В развитие этой темы ученые ИПФ СО РАН представили результаты работ по исследованию материалов на основе КРТ. Так, в докладе к.ф.-м.н. **Сидорова Г. Ю.** (ИПФ СО РАН), посвященном разработке и производству охлаждаемых ИК МФПУ на основе КРТ, акцентировалось внимание на том, что приборы с наилучшими характеристиками изготавливаются на основе тройного раствора  $Cd_xHg_{1-x}Te$  (КРТ), что является одним из критических условий для обеспечения государственной безопасности и технологического лидерства.

В последние десятилетия на базе ИПФ СО РАН шло последовательное формирование пакета технологий, который позволяет реализовать полный цикл разработки и изготовления охлаждаемых МФПУ на основе гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) КРТ для всех ключевых диапазонов ИК-спектра.

Достигнутый в данный момент уровень позволяет выращивать ГЭС КРТ на подложках из кремния или арсенида галлия с любым, заранее заданным профилем состава и легирования, что позволяет выращивать не только фоточувствительный материал под любой спектральный диапазон и конфигурацию фотодиодов, но и квантово-размерные структуры – топологические изоляторы и квантовые ямы.

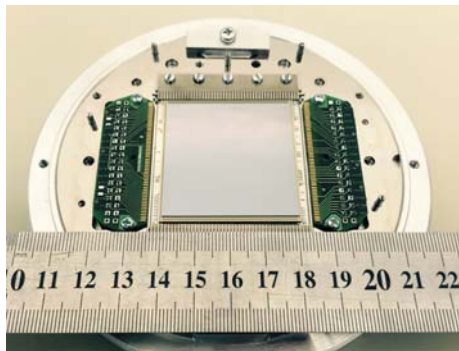


Пример множественных квантовых ям

Технологии изготовления матриц фотодиодов на основе КРТ различной топологии включают возможности:

- изготовления диодов полярности  $n-p$  или  $p-n$ ;
- изготовления фотоприемника с любой спектральной чувствительностью в диапазоне 2–12,5 мкм;
- изготовления меза-структур при помощи мокрого или сухого травления КРТ;
- нанесения диэлектрика методом атомно-слоевого осаждения (АСО);
- получение минимального шага между пикселями 15 мкм;
- получение максимального размера фотоприемной матрицы 40×40 мм.

Отработаны основные принципы проектирования охлаждаемых схем считывания, в том числе для форматов 2000×2000 и 1500×1500 пикселей и 640×512 пикселей с размером ячейки 15 мкм для

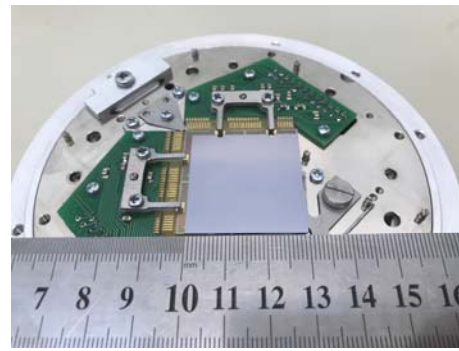


Фотоприемный модуль формата 2000×2000 для диапазона 3–5 мкм

диапазона 3–5 мкм. Реализованы все необходимые современные режимы работы: ITR, IWR, режим окна и другие.

Технология гибридной сборки, разработанная в институте, позволила решить проблемы непланарности крупных кристаллов и точности их соединения, что позволило успешно создать МФПУ форматом до 2000×2000 с шагом 20 мкм, а также МФПУ с шагом до 15 мкм. Перспективным является также переход к гибридизации кристаллов с малым боковым зазором для мозаичных приемников, 3D-stacking и шагом элементов 15 мкм.

Разработана универсальная линейка вакуумных криостатируемых корпусов (ВКК) интегрально сопряженных с МКС разных типов – линейных, роторных и пульсационных. Это позволяет подбирать комбинацию МКС и криостата практически под любую задачу и применение.



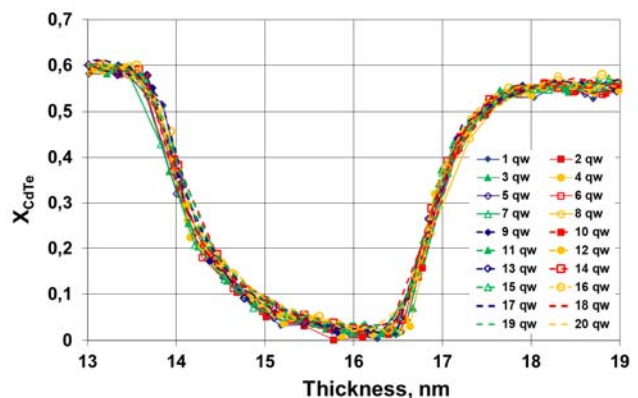
Фотоприемный модуль формата 1500×1500 для мозаичной стыковки в модуль формата 3000×3000 элементов для ИК-диапазона длин волн 1–3 мкм

В докладе к.ф.-м.н. **Михайлова Н. Н.** (ИФП СО РАН) были представлены исследования нового материала для ИК фотоприемников на основе множественных  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  квантовых ям.

Группой ученых ИФП СО РАН, ИФМ РАН, НГУ и ТГУ предложено для создания многоэлементных фотосопротивлений использовать множественные  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  квантовые ямы (КЯ)  $\text{HgTe}/\text{HgCdTe}$ . В сверхрешетках при выращивании необходимо проводить прецизионный контроль толщины  $\text{HgCdTe}$  и  $\text{HgTe}$  слоев. Для структур с множественными квантовыми ямами необходим прецизионный контроль только толщины квантовых ям. При широкозонных барьерах ( $X_{\text{бар}} \geq 0,6$ ) в несколько десятков нм, влияние их толщины и флуктуаций состава не влияет на положение уровней размерного квантования.

Проведены исследования по выращиванию множественных квантовых ям на модернизированной установке МЛЭ «Обь-М». Разработанная методика «эффективной» подложки на основе *in-situ* эллипсометрических измерений при росте

квантовых ям позволила прецизионно восстанавливать распределение состава в квантовых ямах нанометровых толщин. На рисунке приведено распределение состава для 20-слойной МСКЯ по нечетным слоям  $\text{Hg}_{0,975}\text{Cd}_{0,025}\text{Te}$  толщиной 4,1 нм. Показана прецизионная воспроизводимость профиля состава по толщине.

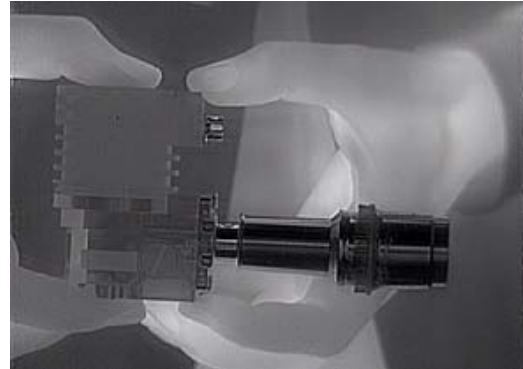


Типичный профиль распределения состава для структуры с 40 КЯ

Разработана лабораторная технология контролируемого выращивания структур с множественными КЯ с эллипсометрическим контролем *in-situ* толщины и состава нанометровых слоев. Разработана методика неразрушающего *ex-situ* контроля и определения положения уровней размерного квантования в структурах с множественными КЯ. Получена корреляционная зависимость длинноволновой границы фотопроводимости от толщины и состава  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  КЯ для комнатной и азотной температур. Экспериментально показано, что при толщине барьерного слоя больше 6 нм не наблюдается изменение длинноволновой границы.

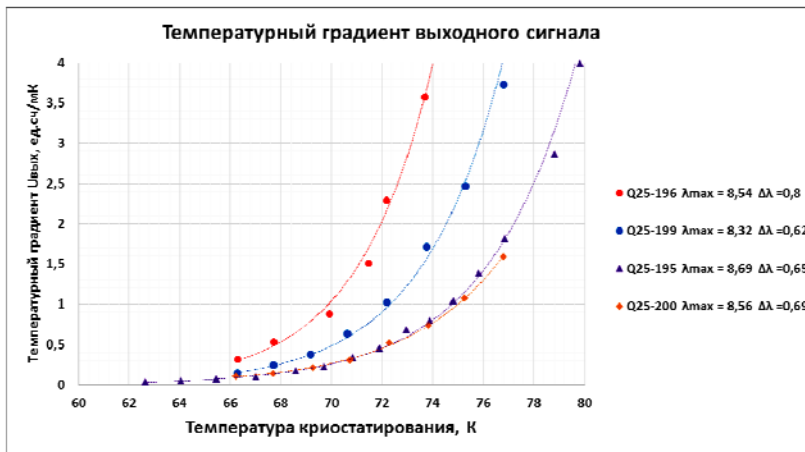
В докладе д.ф.-м.н. **Болтаря К. О.** (ГНЦ РФ АО «НПО «Орион») «Фотоэлектрические и спектральные характеристики матричных фотоприемных QWIP-модулей длинноволнового ИК-диапазона» отмечено, что в последние годы продолжается развитие МФПУ на основе квантово-размерных структур GaAs/AlGaAs. В АО «НПО «Орион» созданы фотоприемные модули (ФПМ) ИК-диапазона спектра на квантово-размерных структурах (QWIP), которые характеризуются улучшенными массогабаритными и мощностными характеристиками. Фотомодули изготавливаются форматом  $384 \times 288$  элементов с шагом 25 мкм или  $640 \times 512$  элементов с шагом 20 мкм. Экспериментально исследованы зависимости длины волны максимума и ширины спектральной характеристики чувствительности от параметров QWIP-структур: мольной

доли Al в барьере AlGaAs и концентрации доноров в слоях GaAs.



*Пример изображения МФПУ на основе QWIP-структуры длинноволнового спектрального диапазона формата  $384 \times 288$*

Исследования показали, что МФПУ длинноволнового спектрального диапазона на основе QWIP-структур перспективны для применения в тепловидении благодаря малой дефектности и малой фотоэлектрической взаимосвязи, что позволяет увеличивать формат изображения при применении микросканирования. Однако основная проблема их широкого применения состоит в высоких требованиях к микрокриогенной системе охлаждения в части низкой температуры криостатирования 70 К и флуктуации температуры менее 1 мК.



*Зависимость градиента выходного сигнала МФПУ от температуры*

С научным обзором состояния исследований и разработок в области инфракрасной термографии выступил д.т.н. **Вавилов В. П.** (Национальный исследовательский Томский политехнический университет). В обзоре был сделан акцент на развивающейся области применения инфракрасной термографии, а именно, тепловом неразрушающем контроле (НК) материалов, так называемом ИК термографическим неразрушающим контролем (infrared thermographic nondestructive testing). Дан-

ная прикладная научно-техническая дисциплина связана с обнаружением и количественной оценкой скрытых структурных дефектов в конструкционных материалах, составляющих основу современной технической цивилизации, а именно, металлов, композитов и гибридных структур различной природы.

Принцип теплового контроля (ТК) заключается в том, что подвергнутое тепловой стимуляции различного вида твердое тело характеризуется

специфическим тепловым полем, в котором скрытые дефекты проявляются в виде температурных аномалий, обнаруживаемых оператором на ИК термоизображениях (термограммах). Оптимальными считаются тепловизоры со следующими обобщенными параметрами: спектральный диапазон 7–13 мкм, размер матрицы ИК-детектора 640×480, температурное разрешение 50 мК, частота кадров 30 Гц. Основными областями применения тепловидения являются диагностика силового электрооборудования и анализ теплового состояния строительных сооружений, а также объектов авиакосмической промышленности. Отдельной областью применения тепловидения является медицинская диагностика. Для улучшения результатов ТК используют алгоритмы анализа нестационарных временных рядов. Наиболее популярными алгоритмами являются Фурье и вейвлет преобразования, метод анализа главных компонент, полиномиальная аппроксимация и анализ производных от температуры по времени.

Были рассмотрены особенности разработки активных тепловых дефектоскопов, методы обработки динамических последовательностей ИК термограмм и области применения ТК в высокотехнологичных отраслях промышленности.

Определены новые подходы к обработке данных в ТК, такие как динамическая тепловая томография (ДТТ), ультразвуковая ИК термография, индукционная ИК термография.

Актуальные теоретические исследования принципиально новых фотоэлектрических эффектов, полезных для фотоэлектроники, в своём докладе представил д.ф.-м.н. **Холоднов В. А.** (Институт радиотехники и электроники и им. В. А. Котельникова РАН, ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»). Теоретически показано, что при определенных профилях неоднородности вдоль электрического поля фотогенерации подвижных носителей заряда в полупроводниках могут проявиться три интересных для фотоэлектроники эффекта. Это самоусиление и самогашение плотности скорости фотогенерации носителей и самоинверсия ее знака. Рассчитаны общие формы этих профилей.

Теоретический анализ также показал, что и в продольном фоторезисторе эффективная скорость фотогенерации носителей может быть положительной, равной нулю и отрицательной, а по абсолютной величине существенно превосходить истинную скорость фотогенерации носителей.

Полученные результаты диктуют проведение дальнейшего всестороннего и углубленного анализа рассмотренных эффектов на предмет исследования перспективы их применения в фотоэлектронике.

В рамках пленарного заседания конференции были освещены современные тенденции создания

отечественных фотоприемников ультрафиолетового (УФ) и видимого диапазонов.

В докладе к.т.н. **Татаурщикова С. С.** (АО «ЦНИИ «Электрон») было отмечено, что предприятие сохраняет и развивает тематические направления по созданию современных фотоприемников УФ и видимого диапазонов, базируясь на имеющихся собственных технологических линиях кристалльного и вакуумного производства. Это, главным образом, фотоприемники на основе ПЗС и гибридные приборы (объединяющие в одном вакуумном объеме фотокатод и электронночувствительную матрицу ПЗС), а также охлаждаемые герметичные фотоприемники на КМОП. Достигнутый уровень таких приборов:

- по линейным ПЗС – до 12000 элементов, с размером пикселя 6,5×6,5 мкм;
- по матричным ПЗС – до 4096×4096 элементов, с размером пикселя 11×11 мкм;
- по гибридным приборам – до 760×580 элементов, с размером пикселя 17×34 мкм;
- охлаждаемые КМОП с числом элементов 2048×2048 и квантовой эффективностью не менее 90 %.

На основе такого гибридного фотоприемника с фотокатодом Cs<sub>2</sub>Te создана УФ ТВ-камера, имеющая обнаружительную способность  $8 \times 10^{12}$  см×Гц<sup>0,5</sup>/Вт на длине волны 285 нм.



*Внешний вид камеры*

Также рассмотрены конструктивно-технологические решения и характеристики других гибридных фотоприемников и камер.

Представитель ПАО «Ростовский оптико-механический завод» **Осипов А. Ф.** рассказал о разработках средств обнаружения в УФ-диапазоне спектра на основе нового класса оптико-электронных приборов – ультрафиолетовых солнечнослепых пеленгаторов. В условиях Земли в ультрафиолетовом солнечно-слепом диапазоне излучение Солнца с длинами волн меньше 300 нм до поверхности Земли не доходит, практически отсутствуют какие-либо излучения природных и искусственных источников, а пропускание атмосферы в этом диапазоне, как показали исследова-

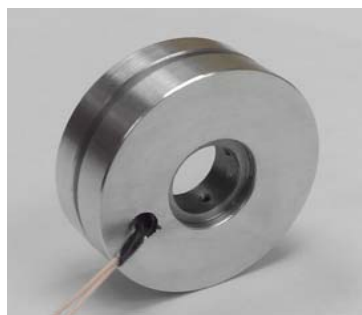
ния, хорошее. Поэтому обнаружить какой-нибудь появившейся ультрафиолетовый объект очень легко.

Для определения угловых координат объектов, излучающих или отражающих излучение в ультрафиолетовом солнечно-слепом диапазоне спектра и предложен оптико-электронный ультрафиолетовый солнечно-слепой пеленгатор, который не формирует изображений, а выдает только угловые координаты УФ-объекта, относительно своей оптической оси. Наилучшей совокупностью основных параметров обладают пеленгаторы на основе многоанодных фотоумножителей с фотокатодом на основе AlGaIn.

Использование этого ФЭУ позволит повысить быстродействие и точность определения координат УФ-пеленгатором, а также даст возможность регистрации сигнатуры ультрафиолетовых объектов (зависимость интенсивности УФ-излучения объекта от времени). По зарегистрированной сигнатуре можно определить тип и назначение цели или объекта.

Определены сферы применения УФ-пеленгаторов, такие, как поиск неисправностей электрических сетей, обнаружение природных и техногенных пожаров, обеспечение безопасности на электрифицированных железных дорогах и др.

О перспективах развития оптико-электронных систем и приборов в филиале ИФП СО РАН «КТИПМ» рассказал руководитель **Чурилов С. М.** В результате проведенных исследований, в Филиале впервые созданы электроуправляемые жидкостные оптические компоненты (ЖОК) – быстро перестраиваемый объектив со временем перефокусировки менее 15 мс во всём диапазоне фокусировки. На базе жидкостной оптики и создана цифровая телевизионная камера с новым функциональным свойством – практически неограниченной глубиной резкости отображаемого пространства.



*Макет жидкостной линзы с электромагнитным актюатором*

Одним из способов повышения дальности действия ОЭС ИК диапазона (8–12 мкм) является применение метода микросканирования (МС) получаемого изображения вдоль плоскости фотоприёмной матрицы по вертикали и горизонтали на величину, кратную размеру пикселя, либо доли его размера. Данный метод позволяет, как компен-

сировать влияние дефектных фоточувствительных элементов, так и повысить размерность изображения (практически вдвое) по сравнению с размерностью применяемого ФПУ. Создано устройство МС на основе роторного синхронного двигателя, позволяющее получить тепловизионное изображение в спектральном диапазоне 8–12 мкм форматом 640×512 при использовании фотоприёмного устройства форматом 320×256 с шагом 30 мкм производства ИФП СО РАН.

Разработан способ активно-импульсного видения с электронным затвором на ПЗС фотоприёмнике. Данный способ основан на оригинальной методике управления фотоприёмником, позволяющей наблюдать несколько откликов лазерного излучателя в одном кадре без потери кадровой частоты. Экспериментальные исследования показали реализуемость способа в условиях дыма и тумана.

С развитием технологий полимерных и композитных материалов, особенно высокопрочных, возникает задача исследования их объёмных характеристик и контроля технологических процессов при их создании. Для материалов, непрозрачных в видимом и ИК-диапазоне, данную задачу можно решить с использованием ТГц-излучения. В Филиале разрабатываются элементы для управления ТГц-излучением (фильтры, поляризаторы, преобразователя фазы), а также эллипсометр на их основе для исследования диэлектрических характеристик материалов, прозрачных в ТГц диапазоне.

В научном обзоре к.х.н. **Попова В. С.** (ГНЦ РФ АО «НПО «Орион») рассмотрено современное состояние исследований и разработок в области создания фотоприемников ИК-диапазона на основе нанодисперсных материалов и структур на их основе. Освещены принципы построения фотосенсоров на указанных материалах, основные используемые вещества и проблемы существующие в данной области науки и техники.

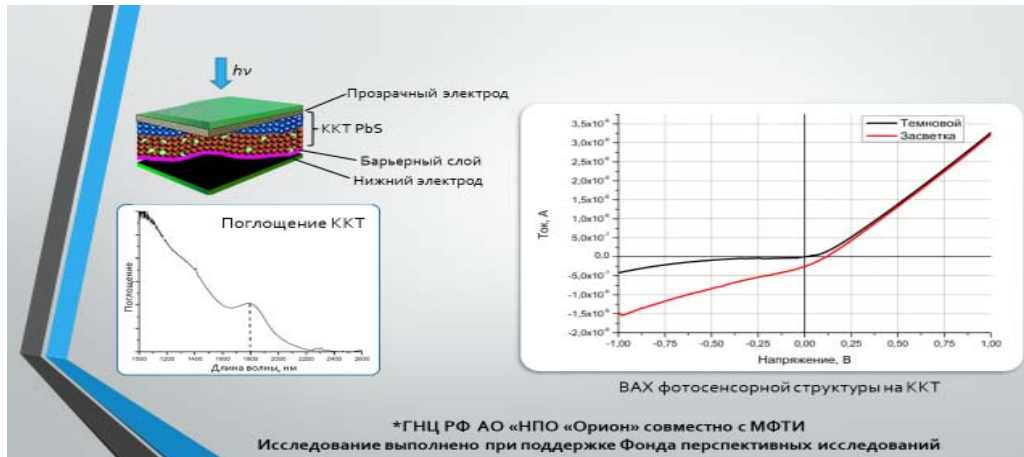
В последние несколько лет нанодисперсные материалы, в первую очередь такие как коллоидные квантовые точки (ККТ) и двумерные наночастицы слоистых полупроводников, не только активно исследуются для применения в фотосенсорике, но и стремительно находят своё место в промышленных образцах матричных фотоприемников ближнего и коротковолнового ИК-диапазонов.

Наибольшие успехи на сегодняшний день достигнуты в области создания фотоприемников на основе нольмерных нанодисперсных материалов – коллоидных квантовых точек. В литературе к настоящему времени описаны ККТ на основе соединений элементов II, IV и VI групп Периодической системы, на которых продемонстрировано фотодетектирование в ближнем, коротковолновом,



средневолновом и длинноволновом ИК-диапазонах. В 2020 году на рынке впервые представлены серийные камеры на основе коллоидных квантовых точек на спектральный диапазон 0,3–2,1 мкм с форматами вплоть до 1920×1080 элементов. В АО НПО «Орион» также ведутся исследовательские работы по созданию МФПУ на основе ККТ.

Отмечено, что формирование фотосигнала в структурах на основе таких материалов имеет ряд особенностей, которые должны учитываться при создании фоточувствительных элементов. Принципы формирования барьерных структур в данных материалах принципиально отличаются от подходов, принятых для объемных эпитаксиальных полупроводниковых материалов и структур.



Фотосенсорная барьерная структура на основе коллоидных квантовых точек

В докладе д.ф.-м.н. **Яковлева Ю. П.** (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН) были представлены исследования и разработки по созданию фотоприемника ближнего ИК-диапазона на основе диодов Шоттки, позволяющего проводить измерения концентрации водорода в окружающей среде при комнатных температурах. Новизна данной разработки состоит в том, что в качестве чувствительного элемента фотоприемника использована структура Pd/n-InP или Pd-Oxide-n-InP, освещаемая излучением из области собственного поглощения InP. При воздействии на структуру газовой смеси N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> по скорости изменения фототока или фотоЭДС может быть измерена концентрация водорода в газовой среде. При этом быстрое действие сенсора при детектировании водорода в концентрациях 1–100 об. % составляет 1–2 с.

действия этих детекторов основан на регистрации изменений их фотоэлектрических характеристик в присутствии водорода.

Для фотоприемника выбран n-InP – прямозонный полупроводник с высокой подвижностью основных носителей заряда. Напыленный слой палладия (Pd) образует потенциальный барьер на границе «анодный оксид–InP».

Для детектирования водорода был впервые применен фотоэлектрический метод регистрации. С увеличением концентрации водорода в газовой смеси уменьшается высота потенциального барьера в структурах. На созданных структурах измерялись фотоэдс и фототок в зависимости от времени в газовой смеси с различным содержанием водорода.

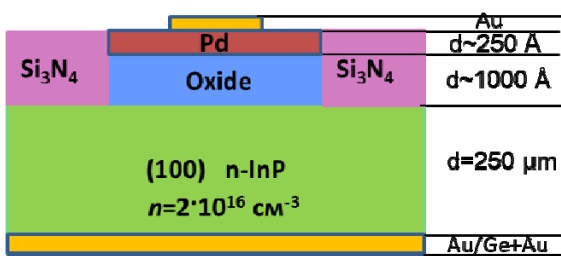
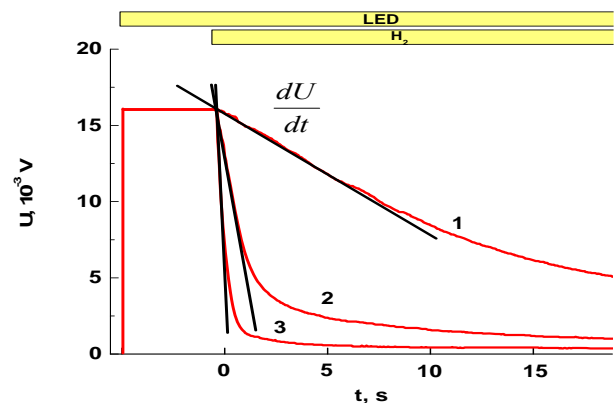


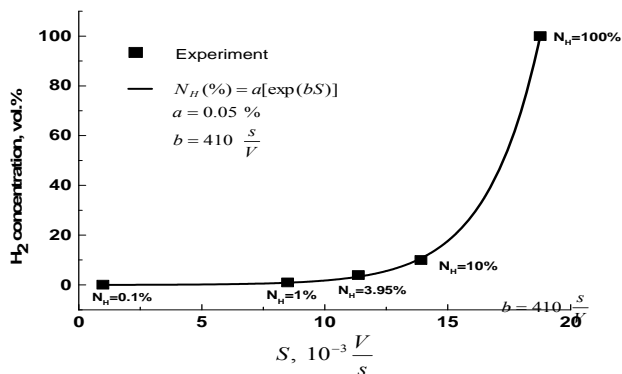
Схема структуры Pd/Оксид/InP

В качестве сенсоров водорода предложен ряд устройств на основе указанной структуры: диоды Шоттки, МДП-структуры, транзисторы. Принцип



ФотоЭДС структуры Pd-оксид-n-InP при подаче на структуру газовой смеси с различным содержанием водорода, N<sub>H</sub>,%: 1 – 0,1; 2 – 1,0; 3 – 10,0

Концентрация водорода и скорость спада фотоэдс или фототока связаны между собой экспоненциально.



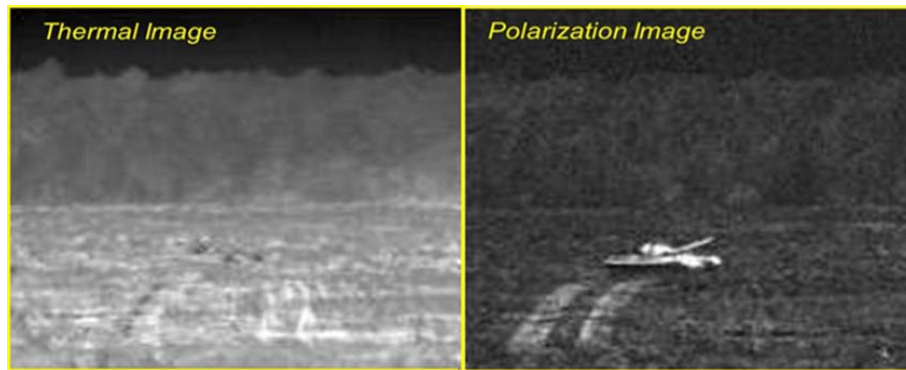
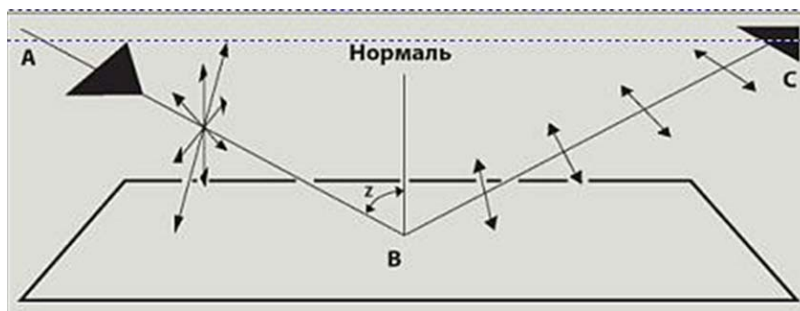
Концентрация водорода в газовой смеси в зависимости от скорости спада (S) фотоЭДС структуры Pd-оксид-n-InP

Установлена корреляция между увеличением концентрации водорода в газовой смеси и увеличением скорости спада фотоЭДС. Показано, что структуры Pd-Oxide-n-InP и Pd-n-InP могут быть использованы при создании эффективных быстродействующих сенсоров водорода с низким энергопотреблением, способных работать при комнатных температурах и позволяющих количественно определять концентрацию водорода в окружающей газовой среде.

Главный конструктор АО «ОКБ «Астрон» Старцев В. В. в своем докладе рассказал о новых

разработках неохлаждаемых матричных микроболлометрических приемников ИК-излучения высокого разрешения с поляризационной чувствительностью. Интерес к разработкам в данной области вызван тем, что технологии поляриметрической визуализации активно используются для обнаружения целей, которые иначе трудно выделить из фона с помехами и при малых энергетических контрастах. Ключевым фактором использования этих технологий является возможность различать естественные и искусственные (сделанные человеком) материалы и сооружения. Учитывая, что достигнут предел по увеличению чувствительности микроболлометрических матриц (за 15 лет чувствительность увеличилась менее чем на 1%), программы направлены на совершенствование технологии и поиски принципиально других подходов к повышению обнаружительной способности.

Принципиально новым подходом является создание тепловизионных приемников чувствительных к поляризованному излучению. Поляризация излучения может возникать при отражении от поверхности техногенных плоских объектов: остекления кабин, поверхностей брони танков, деталей корпусов из пластика и металла, плоскостей, покрытых эмалями и красками. Применение эффекта поляризации тепловизионного излучения позволяет обнаруживать техногенные объекты в условиях недостижимых приемниками с любой высокой чувствительностью.



Увеличение способности селекции целей с использованием поляризации

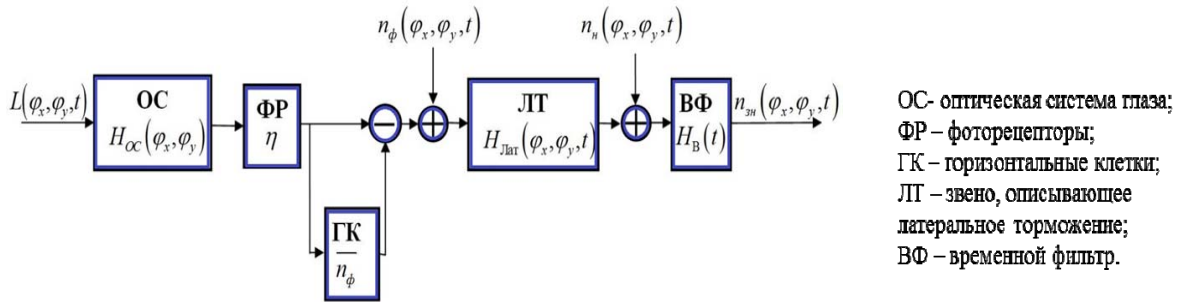
АО «ОКБ «Астрон» разрабатываются технологии и изготовлен макетный образец микроболло-

метрической матрицы формата 1024×768 элементов с шагом 17 мкм с дифракционной решеткой.

**Техника тепловидения**

Секция «Техника тепловидения» открылась докладом д.т.н. **Колючкина В. Я.** (МГТУ им. Н. Э. Баумана) о результатах исследований и разработки методики оценки эффективности оптико-электронных приборов (ОЭП) наблюдения на основе моделей зрительного восприятия человека. Разработка методики, которая основана не на эвристических посылках (методика Джонсона), а на математических моделях зрительной системы че-

ловека, выполняющего функции оператора при наблюдении изображений, которые в достаточной степени адекватно отражают свойства зрительного восприятия, является актуальной задачей. Предлагаемая методика базируется на модельном описании зрительной системы, в том числе, глаза, как системы регистрации и предварительной обработки зрительных образов, а также коры головного мозга, в которой осуществляются процессы первичной и вторичной обработки изображений.



Структурная схема модели глаза человека

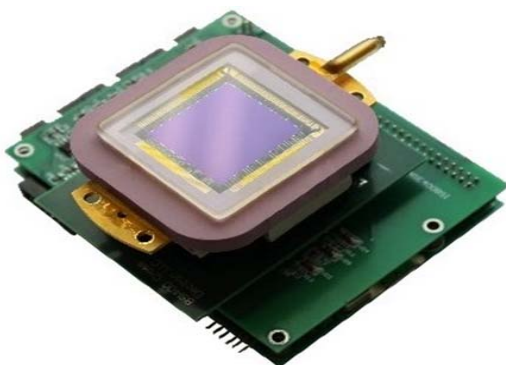
Процессы первичной и вторичной обработки зрительных образов рассматривались на основе гипотез об одноканальной и многоканальной моделей. Из проведённых экспериментальных исследований следует, что одноканальная модель в большей степени адекватна при оценке обнаружения образов бинарных объектов, а для оценки эффективности обнаружения полутоновых образов объектов следует использовать многоканальную модель.

В процессе исследований установлено, что отличие экспериментальных значений вероятности распознавания изображений объектов от значений, рассчитанных на основе предложенной многоканальной модели с анализом в качестве существенных признаков фаз, составляющих пространственного спектра, не превышает 10 %.

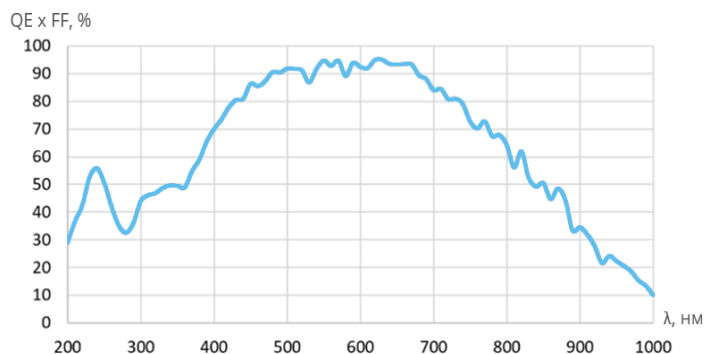
Полученные результаты исследований свидетельствуют об адекватности разработанных моделей зрительной системы человека-оператора и пригодности методики расчёта, основанной на

этих моделях, для оценки вероятностей обнаружения и распознавания изображений объектов, регистрируемых в ОЭП наблюдения.

Результаты разработок универсальной телевизионной камеры, построенной на базе крупноформатной КМОП матрицы GSENSE400BSI, освещаемой с обратной стороны, были представлены **Баталовым К. С.** (АО «ЦНИИ «Электрон»). Использование такой матрицы позволяет обеспечивать работу в спектральном диапазоне от 0,2 мкм до 1,0 мкм с квантовой эффективностью не менее 90 % на длине волны 560 нм, с разрешением 4 Мп (2048×2048 пикселей) при размере пикселя – 11×11 мкм и кадровой частоте 48 Гц (8 бит), 24 Гц (12 бит). Конструктивно фотоприемный узел состоит из КМОП матрицы и термоэлектрического охладителя, размещенных в едином металлокерамическом корпусе с входным окном. Внешний вид фотоприемного узла и спектральная характеристика КМОП матрицы представлена на рисунках.



Внешний вид фоточувствительного узла



Спектральная характеристика КМОП матрицы GSENSE400BSI

Охлаждение КМОП матрицы термоэлектрическим модулем дало ожидаемый результат и позволило охлаждать матрицу с перепадом  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  от температуры теплоотвода даже при токе  $2\text{ A}$  (вместо  $3,9\text{ A max}$ ). Благодаря этому достигаются максимальные параметры матрицы в режиме HDR, такие как темновой сигнал, чувствительность, динамический диапазон и разрешающую способность.

На основе описанного фотоприемного узла была создана тепловизионная камера которая может успешно применяться в научных, астрономических и медицинских исследованиях, системах дефектоскопии и безопасности (слежения), системах формирования изображений при слабом освещении, оптико-электронных системах в экстремальных условиях эксплуатации, в том числе в Арктике.

Камеру коротковолнового инфракрасного диапазона спектра  $0,9\text{--}1,7\text{ мкм}$  разработки ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» представил **Хамидуллин К. А.**

Разработанная АО «НПО «Орион» камера коротковолнового ИК-диапазона спектра является полностью автономным изделием с частотой кадров  $50\text{ Гц}$ , внешней синхронизацией, а также ка-

мера оснащена оптическим затвором для проведения процедуры калибровки. Для управления и передачи данных в камере реализован интерфейс Gigabit Ethernet.



*Камера коротковолнового инфракрасного диапазона спектра*

В камере реализован алгоритм двухточечной коррекции чувствительности с составлением таблиц аддитивных и мультипликативных коэффициентов для выравнивания линейной зависимости сигнала от фона, а также координаты коррекции дефектных элементов, выявленных по одному из трех параметров: сигналу, шуму, нелинейности.

В цифровую обработку изображений, получаемых с использованием камеры введен алгоритм цифрового повышения детализации (DDE).



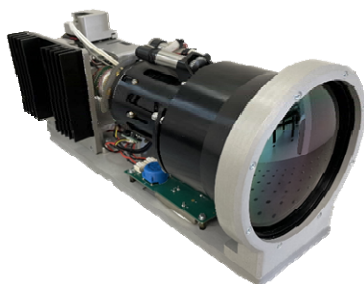
*а)*



*б)*

*Пример DDE-обработки изображения: а) – исходное изображение; б) – изображение с обработкой*

Еще одну разработку АО «НПО «Орион» – оптико-электронный модуль (ОЭМ) средневолнового инфракрасного диапазона спектра на основе отечественного фотоприемного устройства представил **Драгунов Д. Э.**

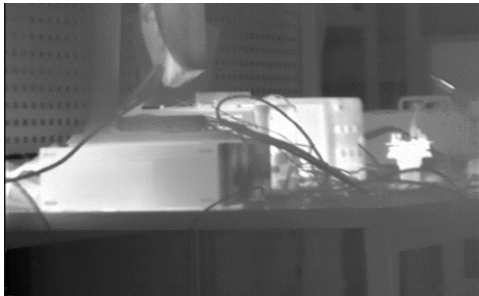


*Внешний вид оптико-электронного модуля*

Основой данного устройства является охлаждаемое МФПУ формата  $640\times 512$  элементов на основе InSb, работающего в спектральном диапазоне  $3,6\text{--}4,9\text{ мкм}$  с охлаждаемой диафрагмой. Также в состав входят блоки управления, обработки, работы с периферией и питания, а также ИК-объектив с трансфокатором.

В ОЭМ реализованы следующие алгоритмы обработки изображения: замена дефектных элементов, линейная автоматическая регулировка усиления (АРУ), алгоритм медианной фильтрации, алгоритм повышения резкости изображения, алгоритм подчеркивания границ, автофокус по произвольной области. Используются три алгоритма калибровки: заводская, стандартная текущая и адаптивная по расфокусированному изображению.

Основным нововведением в обработке видео-изображения является алгоритм подчеркивания границ. Результат его работы представлен ниже.



а)



б)

Примеры изображений: а) – исходное изображение; б) – обработанное изображение с подчеркиванием границ

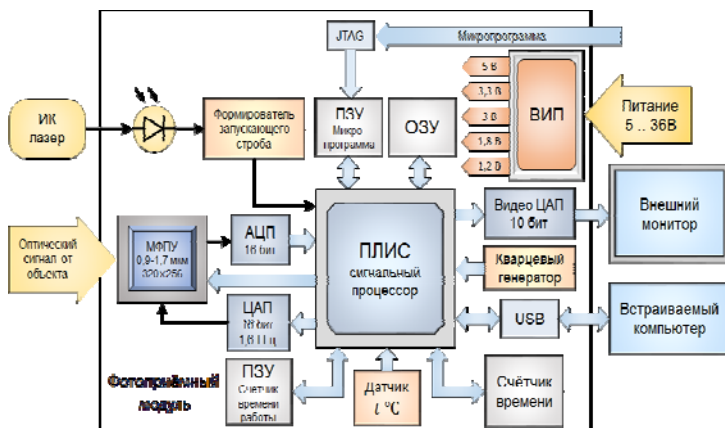
В докладе специалистов ООО «Растр Техно-лоджи» **Бондаренко А. В.** и **Бондаренко М. А.** предложен прототип лазерной локационной си-

стемы с приёмным каналом на базе МФПУ коротковолнового ИК-диапазона ФЭМ28М производства АО «НПО «Орион».

В процессе разработки были решены следующие задачи:

- отработана схемотехника аналоговых регуляторов МФПУ, в том числе отработка схемотехнического решения модуля формирования управляющих сигналов МФПУ, в частности, сигнала RAMP, обеспечивающего измерение дальности. Отработан протокол обмена данными и управления с ПК;
- отработка схемотехнического решения модуля оцифровки выходных данных МФПУ;
- отработка алгоритмов управления МФПУ в яркостном и дальномерном режимах;
- создан модуль «РТ-ЛИДАР» как база приёмного канала лазерной локационной системы;
- создан испытательный стенд, позволяющий имитировать формирование задержек сигнала, соответствующих изменению дальности в диапазоне до 2 км с шагом 1,5 м, оценена погрешность измерений дальности и качества формируемых 3D-изображений.

Разработан программный комплекс LaserLocator для проверки работоспособности и управления устройством, получения лазерных изображений в режимах 2D и 3D, статистического анализа изображений, калибровки и протоколирования результатов.



Структурная схема модуля «РТ-ЛИДАР»



Модуль «РТ-ЛИДАР»

В докладах **Винецкого Ю. Р.** (АО «ПО «УОМЗ им. Э. С. Яламова», филиал «Урал-Геофизика») представлены результаты исследований и разработок алгоритмов и методик для реализации достоверного обнаружения удаленных объектов сканирующими и «смотрящими» оптико-электронными системами.

В одном докладе представлены результаты разработки программного обеспечения, реализу-

ющего на базе персонального компьютера оригинальные алгоритмы совмещения («сшивки») фрагментов изображения, принадлежащих последовательным полосам-«сканам», формируемым сканирующей оптико-электронной системой (ОЭС), т. н. быстрая «сшивка» фрагментов многополосного высокодетального изображения.

Базовым является двумерный корреляционный алгоритм. Были обсуждены проблемные мо-

менты, имеющие место при реализации алгоритма в условиях специфического характера искажений, свойственных изображениям, формируемым ОЭС, располагаемой на борту летательного аппарата. Продемонстрированы «сшитые» фрагменты высо-

кодетальных изображений, подтверждающие высокое качество автоматически выполняемого совмещения. Раскрыты перспективы и возможности дальнейшего развития и совершенствования программного обеспечения.



а) Исходное изображение – выбран фрагмент



б) «Сшитое» изображение

#### Пример «сшивки» изображения

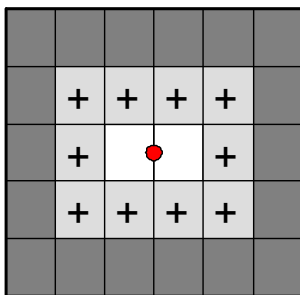
В другом докладе рассмотрена задача обнаружения «смотрящей» ИК-матрицей удалённого воздушного объекта (ВО), у которого угловые размеры меньше пиксельных, методом «гало-плюс».

Матрица содержит значительное число дефектных, так называемых «битых», пикселей, что на практике имеет место в подавляющем числе случаев. Так, в матрицах ведущих мировых производителей среднего и дальнего ИК-диапазонов полного ТВ-формата типовое число «битых» пикселей (в подавляющем количестве – уединенных) составляет  $\sim 10^3$  и более. Такие пиксели, неизбежно принимаемые «классическим» алгоритмом обнаружения за ВО, недопустимо повышают вероятность ложных тревог, а парирование их влияния путем повышения порога с неизбежностью приводит к падению дальности обнаружения.

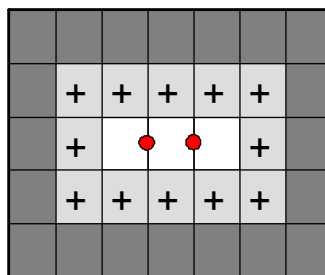
Возможное решение состоит во включении в алгоритм принятия решения об истинности обнаруженного ВО в данном пикселе информации о наличии/отсутствии у него ореола, так называемого «гало»: изображения истинных ВО обязательно сопровождаются таким ореолом вследствие того, что формируются оптической системой со своей,

как правило, центросимметричной функции рассеяния точки (ФРТ). Вместе с тем для «битых» пикселей обладание таким специфическим ореолом является чрезвычайно маловероятным. Таким образом, наличие значимого по интенсивности «гало» у пикселя, принятого классическим алгоритмом за ВО, дополнительно верифицируется фактом наличия у него значимого ореола, и только в этом случае кандидат в ВО регистрируется как истинный объект, что и объясняет данное методу название – «гало-плюс»: метод обнаружения удаленных объектов тепlopеленгатором на основе ИК-матрицы, содержащей дефектные пиксели.

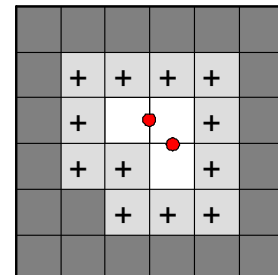
Результаты моделирования показывают, что при соблюдении рекомендаций в отношении выбора размера пикселя, оптимального по критерию отношения сигнал-шум (отвечающем наибольшей потенциальной дальности обнаружения) для данного используемого спектрального диапазона, предложенный метод является достаточно эффективным, чтобы подавлять негативное влияние дефектных пикселей современных ИК-матриц, тем самым приближая значения достижимой дальности обнаружения к их «классическим» значениям.



а) линейный двухпиксельный:  $\delta = 1,4$



б) линейный трехпиксельный:  $\delta = 1,6$



в) Г-образный трехпиксельный:  $\delta = 2$

#### Расширения алгоритма на малопиксельные кластеры

### Материалы фотосенсорики

На секции «Материалы фотосенсорики» учеными Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН представлен ряд докладов по результатам исследований выращивания различных полупроводниковых гетероструктур.

В докладе к.ф.-м.н. **Дворецкого С. А.** (ИФП СО РАН) были представлены материалы исследований новых центров рекомбинации в слоях МЛЭ КРТ на подложках (013) GaAs. Одним из важнейших параметров материалов, используемых для изготовления инфракрасных фотоприемников на основе гетероэпитаксиальных структур теллурида кадмия и ртути (КРТ), является время жизни неосновных носителей заряда, величина которого определяется различными центрами рекомбинации.

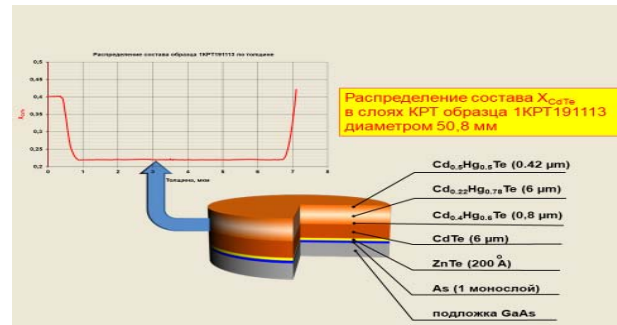
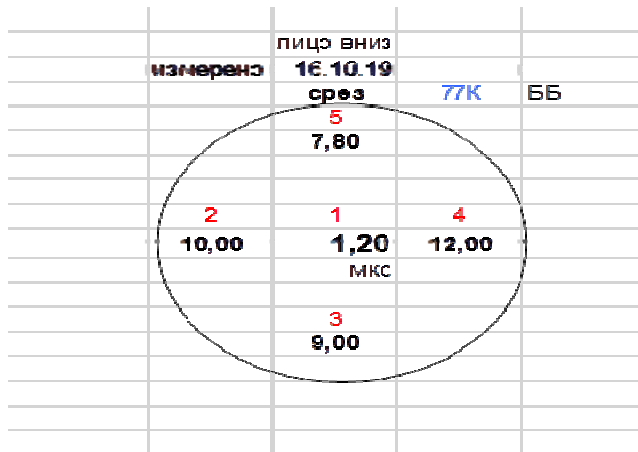
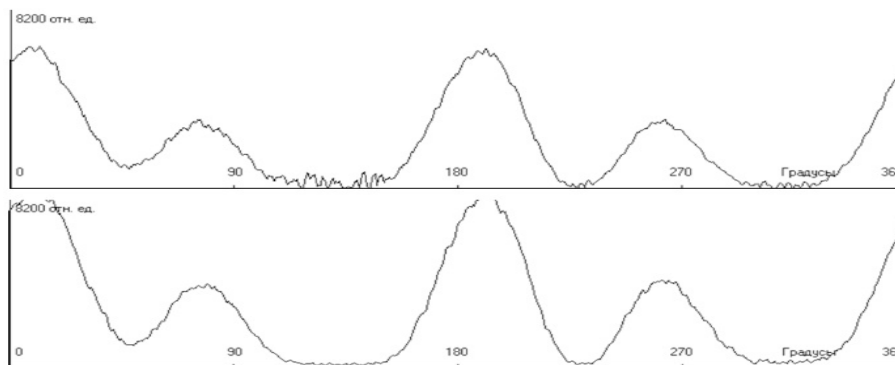


Схема слоев гетероструктуры КРТ

Проведены исследования азимутальной зависимости сигнала второй гармоники отраженного лазерного излучения в гетероструктурах КРТ МЛЭ с варизонными широкозонными слоями на подложках из GaAs (013), имеющих неоднородное распределение времени жизни неосновных носителей заряда по площади (от 1,2 мкс до 12 мкс).



Карта распределения ВЖ по площади ГЭС КРТ МЛЭ на подложке из GaAs диаметром 50,8 мм



Азимутальные зависимости отраженного сигнала ВГ в точке 1 образца (верхний график) и в точке 2 образца (нижний график)

Электрофизические параметры фрагментов структуры с разным временем жизни имели близкие значения: концентрация носителей заряда и подвижность в интервалах  $(2,3-3,15) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и  $62000-66000 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ . Состав поглощающего слоя КРТ  $X_{\text{CdTe}}$  в интервале 0,218–0,221 мол. дол.

Впервые наблюдалось квазипериодическое изменение сигнала в минимуме азимутальной зависи-

мости второй гармоники в области структуры с малым временем жизни по всей толщине слоя КРТ. Предполагается, что особенности азимутальной зависимости сигнала второй гармоники обусловлены разориентированными микроучастками на поверхности и в объеме слоя КРТ, которые являются также новыми центрами рекомбинации носителей заряда и снижают время жизни неосновных носителей заряда.

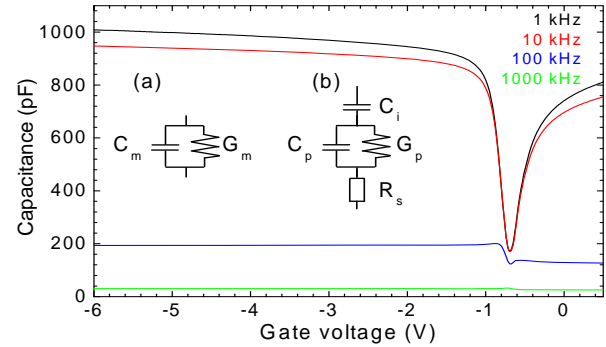
Сопоставляя величину времени жизни с присутствием или отсутствием разориентированных участков, можно сделать вывод о возможном их влиянии на ВЖ и представлять новые центры рекомбинации в слоях КРТ, которые отсутствуют при оптимальных условиях роста.

В докладе д.ф.-м.н. **Швец В. А.** (ИФП СО РАН) обсуждались эллипсометрические *in-situ* методы контроля температуры в низкотемпературных технологиях выращивания узкозонных полупроводников, в частности, контроля температуры в диапазоне 20–300 °С.

Температура является ключевым параметром, который определяет ход физико-химических процессов на поверхности во время создания полупроводниковых структур. По этой причине инструменты для контроля температуры очень востребованы во всех ростовых процессах. Оптические спектры растущего слоя КРТ зависят как от состава, так и от температуры. Экспериментально определены чувствительности спектров параметров  $\Psi$  и  $\Delta$  к температуре и разработан алгоритм, позволяющий следить за изменением температуры и состава в процессе эпитаксиального роста слоёв КРТ.

Разработан комплекс эллипсометрических методов для *in-situ* контроля низкотемпературных процессов при молекулярно-лучевой эпитаксии. Сочетание локальных и интегральных по спектру методов контроля позволяет добиться абсолютной точности измерения температуры  $\pm 3$  °С и чувствительности 0,5 °С. На стадии роста слоёв КРТ удаётся отслеживать изменение температуры и состава. Исследованы температурные режимы выращивания слоёв КРТ и на основании этих исследований внесены корректировки в регламент управления мощностью нагревателя.

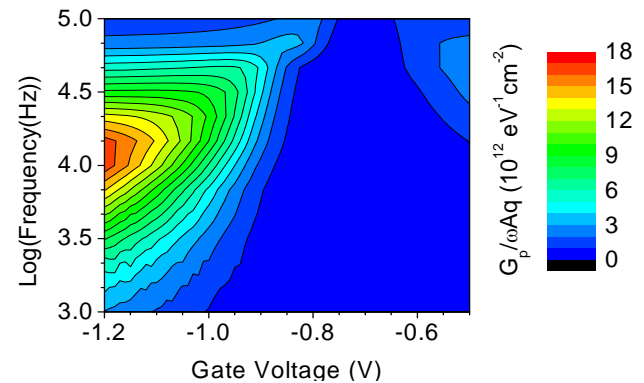
**Горшков Д. В.** (ИФП СО РАН) представил результаты исследований границы раздела  $\text{HfO}_2/\text{HgCdTe}$ , полученной методом плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения (ПАСО) при 120 °С. Тройное полупроводниковое соединение кадмий-ртуть-теллур (КРТ) активно применяется для создания планарных матриц фоточувствительных в инфракрасной области спектра. Для повышения характеристик фоточувствительных элементов таких матриц необходимо пассивирующее покрытие. Технология атомно-слоевого нанесения позволяет осуществлять воспроизводимое и контролируемое нанесение различных диэлектрических плёнок. Показано, что в оптимальном режиме роста доля азота и углерода в плёнке  $\text{HfO}_2$  (оксида гафния), выращенной при 120 °С, снижается. Используя вольт-фарадные характеристики, было показано, что электрические свойства однородны по всей поверхности образца.



$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega C_i^2 G_m}{G_m^2 + \omega^2 (C_i + C_m)^2}$$

#### Результаты измерения вольт-фарадных характеристик

Была рассчитана эквивалентная параллельная проводимость для оценки плотности поверхностных состояний.



$$D_{it} = 2,5 \frac{1}{Aq} \left( \frac{G_p}{\omega} \right)_{\max}$$

#### Карта параллельной эквивалентной проводимости

Установлено, что исследуемая диэлектрическая плёнка  $\text{HfO}_2$ , выращенная при температуре 120 °С методом ПАСО, обладает достаточной адгезией для использования её в производственных и эксплуатационных циклах на планарных матрицах на основе КРТ. Обнаружен малый разброс величины встроенного заряда и ёмкости диэлектрической плёнки. Плотность поверхностных состояний соизмерима с плотностью поверхностных состояний границы раздела  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -КРТ.

На секции «Материалы фотосенсорики» также представлен ряд докладов в развитие темы коллоидных квантовых точек. Были представлены исследования специалистов Московского физико-технического института (национальный исследовательский университет).

**Конавичева В. А.** (МФТИ) рассказала о влиянии природы лигандов и растворителей на ско-



рость замещения в тонком слое коллоидных кантовых точек на основе сульфида свинца (PbS). В работе было изучено влияние природы следующих лигандов на скорость замещения: TBAI, SCN, Na<sub>2</sub>S и NH<sub>2</sub>CHO. Также проведены исследования по влиянию природы растворителей на скорость замены в тонком слое, таких как изопропанол и ацетонитрил. Экспериментальным путем показано, что в случае использования TBAI и SCN в изопропанолу замена лигандов происходит быстрее.

Представитель Сербии **Миленкович Теодора** (МФТИ) представила исследования по влиянию замены лигандов на свойства тонких пленок коллоидных квантовых точек теллурида ртути (HgTe). Спектральная перестраиваемость теллурида ртути в среднем и дальнем ИК-диапазоне, а также большой радиус экситона Бора (30 нм) делают квантовые точки HgTe перспективными кандидатами для применения в лазерах, приборах телекоммуникации, фотосенсорах, и т. д. Были получены тонкие пленки ККТ с помощью dip coating, методом послойного нанесения. Морфология поверхности и шероховатость полученных пленок определена атомно-силовой микроскопией. Также с помощью АСМ были проанализированы толщины пленок в зависимости от различных замен лигандов.

Некоторые аспекты химии коллоидных квантовых точек халькогенидов свинца исследовал в своей работе **Шуклов И. А.** (МФТИ). Автор отметил, что широкополосное поглощение в сочетании с большим радиусом экситона Бора коллоидных квантовых точек халькогенидов свинца (18 и 46 нм для PbS и PbSe, соответственно) делает их крайне интересными кандидатами для применений в солнечных батареях, телекоммуникационных приборах, фотодетекторах и электролюминесцентных устройствах.

Разработаны подходы к синтезу нескольких типов ККТ PbS. ККТ PbS малого размера с первым экситонным пиком от 760 нм синтезировались за счет замедления роста ККТ тиолами на стадии синтеза. Были найдены условия пост-синтетической обработки ККТ, позволяющие достичь долговременной коллоидной стабильности. Также был разработан простой метод получения образцов ККТ PbS за счет «старения» более крупных нанокристаллов PbS. Этот метод не требует применения сложного оборудования и максимально прост в применении.

Синтез ККТ PbSe, как правило, осуществляется за счет реакции прекурсоров свинца с триоктилфосфин селенидом. Этот реагент очень чувствителен к кислороду при хранении и проведении синтеза. Также использование этого прекурсора дает нестабильные результаты за счет нестабильного качества исходного триоктилфосфина. Были исследованы альтернативные прекурсоры селена

на основе олеиламина. Они менее требовательны к условиям синтеза и позволяют получить ККТ PbSe с хорошими спектральными характеристиками. Была исследована обработка суспензий ККТ PbSe с помощью растворов галогенидов аммония, позволяющая сильно повысить окислительную стабильность ККТ PbSe в суспензиях. Образцы ККТ PbSe без обработки NH<sub>4</sub>Cl демонстрировали потерю стабильности уже на 2 сутки.

Представитель АО «ОКБ «Астрон» к.ф.м.н. **Хафизов Р. З.** в продолжение темы о новых разработках неохлаждаемых матричных микроболометрических приемников, озвученной на пленарном заседании, представил экспериментальные данные по измерению постоянной времени тепловой релаксации матричного болометрического детектора. В числе параметров и характеристик болометрических матриц важнейшей является постоянная времени тепловой релаксации  $\tau_r$ , влияющая на их инерционность. В докладе представлены разработанные методы измерения постоянной времени тепловой релаксации матричного микроболометрического детектора с использованием экспериментальных данных, полученных при воздействии на элемент детектора модулированного оптического возбуждения, а также при выделении релаксационной характеристики из профиля размытия изображения точечного теплового объекта в процессе его движения. Реализация возможностей предлагаемых методов обеспечена специализированными алгоритмами программного обеспечения, использованного при измерениях. Разработанные методики апробированы в экспериментах с болометрическим модулем ОКБ «Астрон» 640БД17 (формат 640×480, шаг пикселей 17 мкм).

Интересный доклад о современном состоянии технологий получения некоторых объемных кристаллов фотоники представил **Наумов А. В.** (АО «ОКБ «Астрон»).

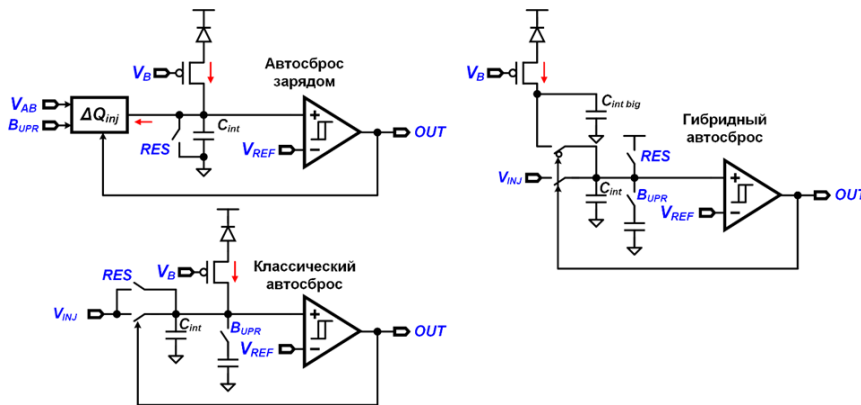
Проведен анализ современного состояния рынка некоторых основных кристаллов фотоники, методов получения объемных кристаллов. Рассмотрено состояние дел в области получения основных кристаллов для проходной оптики – Si, Ge, ZnSe. Что касается фоточувствительных материалов, то сегодня применяются технологии выращивания CdZnTe для HgCdTe; технологии InSb; технологии квантоворазмерных структур на квантовых ямах в системе AlGaAs-GaAs. В промышленном производстве объемных кристаллов фотоники преимущественно используются: метод Чохральского (в различных вариантах), метод горизонтальной направленной кристаллизации в вариантах «по Бриджмену» (Horizontal Bridgman – HB) или «кристаллизации в движущемся градиенте температуры» (Horizontal Gradient Freeze –

HGF) и метод вертикальной направленной кристаллизации в тех же двух вариантах (Vertical Bridgman – VB и Vertical Gradient Freeze – VGF). Используются также методы осаждения из газовой фазы chemical vapor deposition CVD, physical vapor deposition PVD, direct vapor transport (DVT) technique. Применяются также методы зонной плавки (Travelling Heater Method) и бестигельной зонной плавки (БЗП). Также, рассмотрены текущее состояние и перспективы развития различных методов получения объёмных кристаллов для фотоники в мире и в России.

В своём докладе **Ларионов Н. А.** (ГНЦ РФ АО «НПО Орион») рассказал о гибридной цифровой ячейке считывания. Целью интегральной схемы считывания (ИСС) является считывание и преобразование электрического сигнала, генериру-

емого фоточувствительным элементом (ФЧЭ). ИСС могут быть разработаны как с аналоговым трактом обработки сигнала, так и с цифровым, которому отдается предпочтение в современных ФПУ. Преобразование сигнала с ФЧЭ в цифровой формат может быть выполнено на уровне ячейки считывания или в столбце, если требуется минимизировать размеры ячейки. Были рассмотрены основные архитектуры накопительных ячеек с АЦП: с автоматическим сбросом напряжения, с широтно-импульсной модуляцией и с автоматическим вычитанием заряда.

Произведена реализация и тестирование ячеек считывания, работающих по принципу автосброса. Рассматривались три варианта исполнения: классический автосброс, автосброс зарядом и гибридный автосброс.



*Принципиальные схемы ячеек: автосброс, автосброс зарядом, гибридный автосброс*

В новом варианте с гибридным автосбросом был достигнут ряд преимуществ и устранены недостатки присущие классическому варианту. Принцип его работы заключается в том, что накопление фотозаряда происходит на двух конденсаторах большой и малой емкости. При достижении опорного уровня компаратора большой конденсатор размыкается ключом от входа компаратора, в это же время этот вход вместе со вторым конденсатором с малой емкостью подключается ко второму опорному уровню  $V_{INJ}$ , который меньше напряжения  $V_{REF}$ . Это приводит к быстрому переключению компаратора в исходное состояние, при этом малая емкость вычитает заряд с большой. Такой принцип работы позволяет достичь более высокой частоты осцилляций, обеспечить плавный выход в насыщение, улучшить линейность, снизить требования к быстродействию компаратора и величине помех на напряжении питания.

### Системы и методы измерений. Спектроскопия. Лазерные системы

В докладе **Преображенского В. В.** (Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН) представлены результаты разработки детекторов

одиночных фотонов для систем квантовой криптографии. Разработана конструкция и спроектирована топология однофотонного лавинного фотодиода (ОЛФД) на основе гетероструктуры InP/InGaAs/InP. Методом планарной технологии изготовлены чипы ОЛФД. Предложен способ и определены условия проведения локальной диффузии цинка с целью получения заданного профиля распределения примеси р-типа и толщины области лавинного умножения. Разработаны методы контроля параметров отдельных слоев гетероструктуры и ОЛФД в целом.

Гетероструктуры выращивались методом МЛЭ на подложке  $n^+$ -InP. Основными параметрами, определяющими работоспособность ОЛФД в гейгеровском режиме как детектора одиночных фотонов, являются квантовая эффективность счета (15–25%), частота темновых импульсов менее 50 кГц и коэффициент послеимпульса менее 15%. Для достижения предельных параметров ОЛФД, работающих в счетном режиме, требуются экстремально малые темновые токи при обратных напряжениях вблизи пробоя. Для этого необходима минимизация уровня фоновых примесей в слоях гетероструктуры. Были проведены исследования влияния условий выращивания этих слоев на уровень фоновых примесей и дефектов в них с

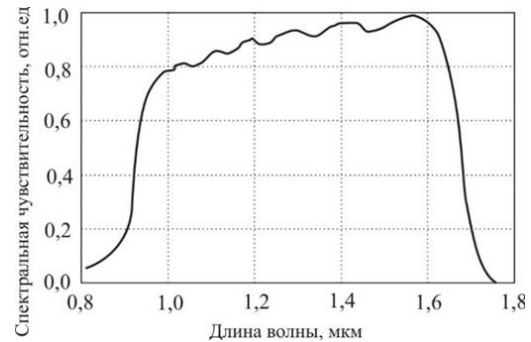
помощью сочетания методов C-V измерений ртутного зонда и МДП структуры с послойным травлением эпитаксиальных слоев. Для измерения параметров чипов (квантовая эффективность счета, частота темновых импульсов и коэффициент послеульсаций) разрабатывается оригинальный исследовательский стенд. Достигнутые величины темнового тока при температуре 217 К вблизи пробоя менее  $10^{-11}$  А, коэффициент лавинного умножения (25–30) в линейном режиме и темновая частота счета (менее 50 кГц при перенапряжении до 3,5 В) в режиме Гейгера не уступают результатам мирового уровня.

К.х.н. **Поповым В. С.** (ГНЦ РФ АО «НПО «Орион») представлены исследования возможности использования SWIR-камеры диапазона 0,9–1,7 мкм для обнаружения скрытых элементов изображения на различных предметах живописи.

При проведении исследования двух объектов живописи, выполненных в различной технике, проведено сопоставление спектров отражения материалов входящих в состав красочных слоёв и изображений, полученных с помощью SWIR-камеры (0,9–1,7 мкм) и модифицированной камеры кремниевой камеры диапазона 1,13–1,2 мкм.

Существенную роль, определяющую широту использования определенного спектрального диапазона в исследовании предметов искусства, играет доступность оборудования, в первую очередь, зависящая от его стоимости.

Наиболее доступным является исследование в диапазоне 0,75–1,2 мкм, которое как правило выполняется с использованием недорогих модифицированных потребительских фотокамер на основе кремниевых матриц, чувствительность которых достигает 1,2 мкм. Модификация серийной камеры при этом сводится к удалению отсекающего ИК-область спектра фильтра, и дальнейшим использованием другого фильтра, напротив отсекающего видимую и УФ части спектра. Поскольку на рынке потребительских фотокамер сейчас широко представлены камеры с форматами матрицы 16 мегапикселей и более, исследователи имеют возможность получать инфракрасное изображение объектов живописи сразу большого разрешения.

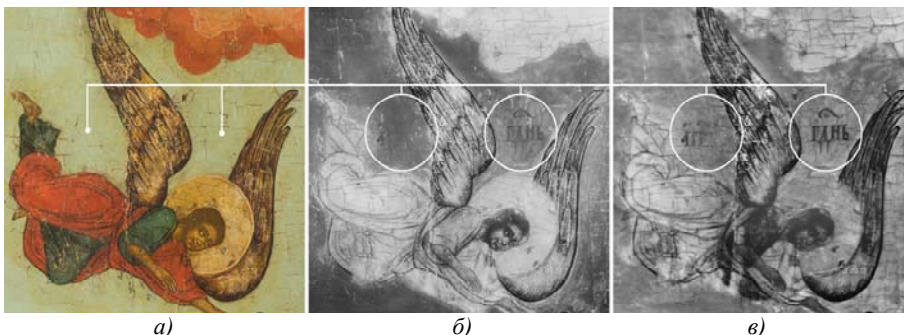


SWIR-камера коротковолнового ИК-диапазона (АО «НПО «Орион»)

Использование спектрального более длинноволнового диапазона за пределами 1,2 мкм требует принципиально другой техники, которая существенно отличается в цене из-за особенностей технологии и, как правило, формат матрицы редко превышает 0,3 мегапикселя. Вместе с тем сама возможность получения качественно более полной информации об объекте культурного наследия делает применение таких камер обоснованным.

С применением модифицированной камеры диапазона 1,13–1,2 мкм и SWIR-камеры диапазона 0,9–1,7 мкм было проведено исследование двух объектов живописи иконы первой трети XVIII века и картины первой трети XX века, выполненных в существенно отличающихся техникой исполнения, в которых обнаружены скрытые элементы живописи.

На основе анализа химического состава красочных слоёв и грунта проведено сопоставление наблюдаемых изображений в указанных спектральных диапазонах и спектров отражения отдельных слоёв материалов, что позволило описать условия наблюдения скрытых элементов живописи.



Изображения участка иконы «Чудо Георгия о змие» (первая треть XVIII века), полученные в различных спектральных диапазонах: а – видимый (0,4–0,7 мкм); б – ближний ИК (1,132–1,2 мкм); в – короткий ИК (0,9–1,7 мкм)

Главный конструктор по НИОКР ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» **Полесский А. В.** в двух докладах представил материалы, касающиеся новых подходов и методов измерения параметров фотоприемников и фотоприемных устройств второго поколения, а также нововведений в части терминов и определений.

Согласно ГОСТ Р 59605-2021 «Оптика и фотоника. Приемники излучения полупроводниковые. Фотозлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения» к фотоприемным устройствам (ФПУ) второго поколения относятся ФПУ с большой интегральной схемой считывания (БИС считывания), имеющие формат до 1280×1024, каждый пиксель которого передает только информацию об уровне собственной облученности в одном спектральном диапазоне.

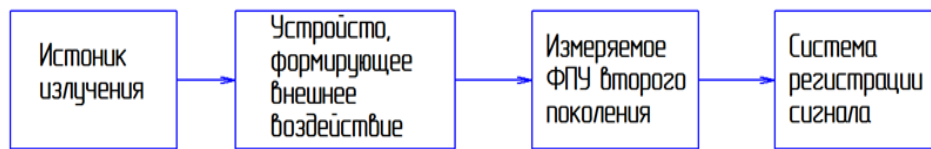
Данные ФПУ в настоящее время широко используются в России, и схемы измерения их параметров и характеристик, а также формулы для этих параметров и характеристик расчета извест-

ны. Однако для создания полноценных методик измерения необходимо решить вопрос погрешностей измерения.

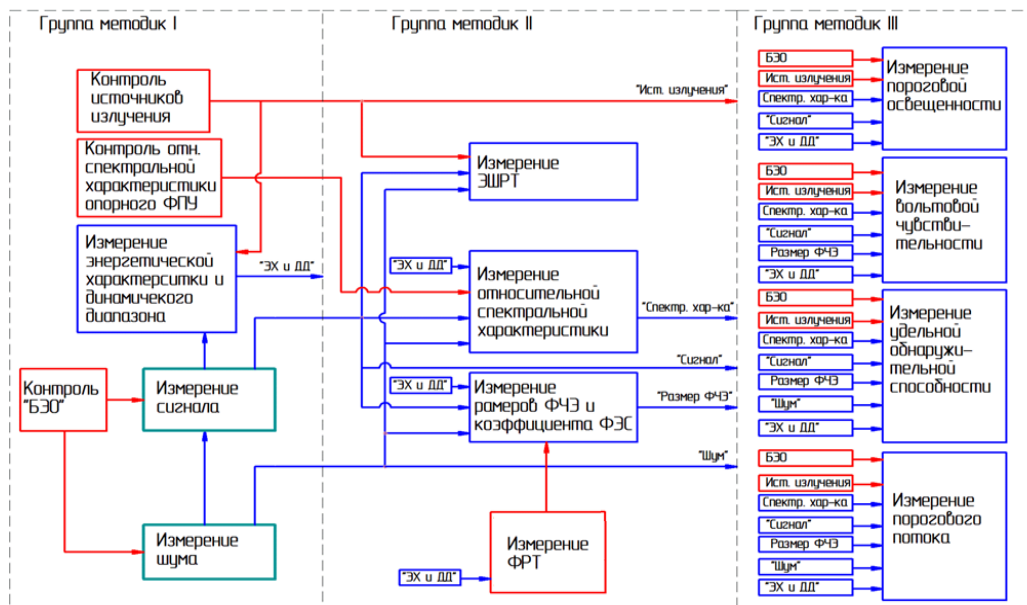
Структурная схема работы любого измерительного стенда/установки для контроля параметров ФПУ второго поколения приведена ниже.

Из структурной схемы работы стендового оборудования видно, что для обеспечения расчета погрешностей измерения помимо основных методик измерения, необходимы методики контроля вспомогательного оборудования (блоки электронной обработки, программное обеспечение, источники излучения и т. д.). При этом для вспомогательного оборудования должны быть нормированы некоторые специфические параметры, которые не отражены в нормативной документации на данное оборудование (описании типа, ГОСТ и др.).

Для обеспечения прослеживаемости связи между методиками измерений удобно отобразить в виде схемы, приведенной на рисунке.



Обобщенная структура измерительного оборудования для контроля параметров и характеристик ФПУ второго поколения



Структура и взаимосвязь методик измерения ФПУ второго поколения

На рисунке синим цветом показаны методики измерения параметров ФПУ второго поколения. Зеленым цветом – «базовые» методики измерения сигнала, шума именно на основании величины сигнала и шума. Красным цветом отмечены методики контроля используемого вспомогательного оборудования.

Для удобства работы и анализа погрешностей измерения методики измерения ФПУ второго поколения и контроля вспомогательного оборудования поделены на группы.

На основе приведенной структуры методик измерения параметров ФПУ второго поколения была решена задача метрологического обеспече-

ния, в частности, определения состояния измерений, при котором их результаты выражены в законных единицах измерений (величин) и оценены их неопределенности, в т. ч. когда пределы погрешностей результатов измерений не выходят за установленные пределы.

Для обеспечения единства измерений ФПУ первого и второго поколений были проведены работы по разработке и выпуску соответствующих ГОСТов, в том числе, а) совместно с Техническим комитетом по стандартизации ТК 296 «Оптика и фотоника» переработан ГОСТ 21934-83 «Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения», б) выпущен новый ГОСТ Р 59605-2021 «Оптика и фотоника. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения», в) разработан новый ГОСТ Р 59606-2021 «Оптика и фотоника. Устройства фотоприемные второго и последующих поколений. Методы измерений фотоэлектрических параметров и определения характеристик». Указанные ГОСТы введены в действие с 01.03.2022 г.

### **Твердотельная фотосенсорика. Приборы ночного видения**

В докладе **Сотниковой Г. Ю.** (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН) приводятся и анализируются основные характеристики неохлаждаемых ФД на основе гетероструктур, содержащих поглощающие слои из InAs и/или InAsSb ( $\lambda = 3\text{--}6$  мкм), включая данные, полученные при измерении низкочастотных шумов, и параметры фотоприёмных устройств (ФПУ) на их основе, обеспечивающих максимально возможное отношение сигнал/шум, получаемое на выходе предварительного усилителя.

Показано, что характеристики этих ФД в совокупности со схемными решениями разработанных ФПУ позволяют не только значительно улучшить метрологические характеристики уже существующих измерительных систем, но и создавать новые оригинальные измерительные методики.

Бесконтактность, высокие спектральная чувствительность и селективность, отсутствие инерционности, невосприимчивость к внешним засветкам, например, в области до 1 мкм, возможность проведения измерений на незначительных объемах вещества делает использование указанных ФПУ оптимальным решением для достоверного экспериментального определения теплофизических свойств объемных и пленочных материалов и

функциональных элементов на их основе методом лазерной фототермической радиометрии (ФТР) в широком диапазоне температур. Приведены примеры реализованных экспериментальных установок, использующих методы модулированного лазерного теплового воздействия для определения пироэлектрических и электрокалорических свойств материалов, изучения влияния структурных и контактных неоднородностей на характеристики полупроводниковых (диэлектрических) материалов и функциональных элементов на их основе, а также количественной оценки определения коэффициента теплоотдачи твердотельных объектов. Экспериментально подтвержденная точность измерения температуры в указанных выше измерительных системах составляла 50 мК в диапазоне температур объекта около 20 °С, 5 мК при 100 °С и 1 мК при температурах выше 200 °С при быстродействии температурного сенсора 2 мс и линейных размерах исследуемого участка объектов порядка 5 мм. Высокая достоверность, стабильность и воспроизводимость измерений обеспечивалась алгоритмом предварительной калибровки температурного сенсора.

Высокое временное разрешение, широкий динамический диапазон и возможность создания мультиспектральных структур позволили создать пирометрическую систему для мониторинга температуры поверхности твердотельных объектов в условиях плазменного разряда. Система обеспечивает регистрацию динамики изменения температуры элементов конструкции и материала покрытия поверхности внутри камеры токамака Глобус-М2 во время плазменного разряда, с временным разрешением до 500 ns при изменении их температуры от 100 °С до 3500 °С. Разработанные методики измерений и алгоритмы обработки данных позволяют также регистрировать изменение структуры взаимодействующей с плазмой поверхности материала и связанное с ним изменение теплопроводящих свойств.

Таким образом:

– отечественная элементная база MWIR-фотодиодов позволяет не только значительно улучшить метрологические характеристики уже существующих пирометров, но и создавать новые оригинальные измерительные методики;

– разработан специализированный пирометр для исследований фундаментальных теплофизических свойств диэлектрических материалов с использованием лазерных термоволновых методик, который не имеет аналогов не только в России, но и за рубежом;

– впервые представлен двухволновой пирометр MWIR-диапазона с временным разрешением 1 мс диапазоном измерения температуры от 100 до

3500 °С, предназначенный для контроля температуры элементов конструкции внутренней поверхности термоядерного реактора во время плазменного разряда, который по совокупности параметров превосходит известные двухспектральные аналоги.

Новую концепцию пировидикона на основе пироэлектрического электронно-оптического преобразователя диапазона 1–14 мкм представил **Терещенко О. Е.** (Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН).

Неохлаждаемые пироэлектрические преобразователи теплового изображения (пириканы) в среднем и дальнем инфракрасном (ИК) диапазонах спектра, обладают свойством неселективности по спектру и детектируют только изменение интенсивности падающего излучения. Благодаря этим свойствам они находят широкое применение в ИК-технике для точных спектральных измерений, наблюдения и распознавания объектов, медицинской и промышленной диагностике, а также для специальных применений.

Была представлена концепция пировидикона, представляющего собой пирикон со сплошной мишенью из пироэлектрика  $Sr_{1-x}Ba_xNb_2O_6$ , интегрированной в вакуумный фотодиод с мультищелочным фотокатодом. В отличие от стандартного пировидикона роль катода выполняет мультищелочной катод, а сканирование электронным пучком осуществляется разверткой лазерного луча. Изменение температуры, вызванное инфракрасным изображением, создает соответствующее распределение потенциала, которое считывается сканирующим электронным лучом. К преимуществу пирикона можно отнести отсутствие мультиплексора, роль которого выполняет считывающий электронный пучок. Недостатком – отсутствие внутреннего усиления пироэлектрического сигнала. Одним из решений преодоления отмеченного недостатка является создание пироэлектрического электронно-оптического преобразователя (ПЭОП).

Предложен ПЭОП с пиромишенью на основе пленки SBN со сквозными отверстиями для прохождения электронного потока, который модули-

руется в соответствии с распределением потенциала на поверхности мишени, возникающим при проецировании на мишень теплового излучения. Были изучены пироэлектрические и оптические свойства пленок SBN:La толщиной 0,5–2,5 мкм, выращенные методом высокочастотного вакуумного осаждения на поверхность тонких металлических фольг и кремния, а также состав, структура и морфология полученных пленок SBN. Полученные величины пирокоэффициента  $\gamma$  варьировались в диапазоне 6,1–81,5 нКл/(см<sup>2</sup>К) в зависимости от температуры роста и толщины пленок. Изучен фазовый переход.

Собран первый прототип ПЭОП на основе ЭОП-2<sup>+</sup>, в котором изучены фотоэмиссионные свойства и проведены измерения энергетического распределения фотоэлектронов, проходящих сквозь пиромишень.

Представитель Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН **Ременный М. А.** выступил с двумя докладами, посвященными фотоприемникам, работающим в длинноволновой (8–14 мкм) и средневолновой (3–6 мкм) ИК-областям спектра.

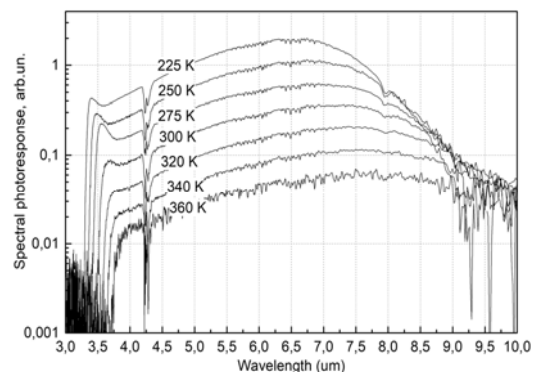
Длинноволновые ИК фотоприемники на основе ДГС P InAsSb/n InAsSb<sub>0,4</sub>/n InAsSb ( $\lambda_{0,5} = 9,5 \mu\text{m}$ ,  $T = 360 \text{ K}$ ).

Одним из активно развиваемых в последнее время подходов, является использование гетероструктур с фоточувствительной областью из твердого раствора InAsSb, выращиваемых на подложке InAs, в которых при вводе излучения через подложку получена длинноволновая граница около 12 мкм и которые характеризуются фотодиодным режимом работы при температурах вплоть до 350 К.

Были исследованы и созданы высокоэффективные фотодиоды флип-чип конструкции, сочлененные с иммерсионными линзами, со спектром фотоответа от 3,5 до 10 мкм на основе гетероструктуры N-InAsSb/InAsSb<sub>x</sub>/P-InAsSb ( $x \geq 0,35$ ), работающих как при термоэлектрическом охлаждении, так и при повышенных температурах до 360 К (рисунки).



Фотодиод с 3-х каскадным ТЭО



Спектры фоточувствительности фотодиода на основе гетероструктуры N-InAsSb/InAsSb<sub>0,4</sub>/P-InAsSb

Были исследованы спектральные характеристики электролюминесценции и фоточувствительности, вольт-амперные характеристики фотоприемника на основе гетероструктуры  $N\text{-InAsSb}/\text{InAsSb}_x/\text{P-InAsSb}$  ( $x \geq 0,35$ ) в широком интервале температур. Приведены данные о влиянии состава фоточувствительной области в диапазоне составов  $x \leq 0,4$  на параметры чувствительности; проводится сравнение характеристик полученных приемников с коммерчески доступными аналогами на основе материалов КРТ. Показано, что использование твердого раствора  $\text{InAsSb}$  – перспективно для создания быстродействующих длинноволновых фотоприемников, работающих в широком интервале температур, в качестве альтернативы тепловым приемникам и более дорогим фотонным приемникам на основе материалов КРТ.

Фотодиоды на основе ДГС  $P\text{-InAsSb}/n\text{-InAsSbP}$  для спектральной области 3–6 мкм, работающие вплоть до  $T = 400\text{ K}$ .

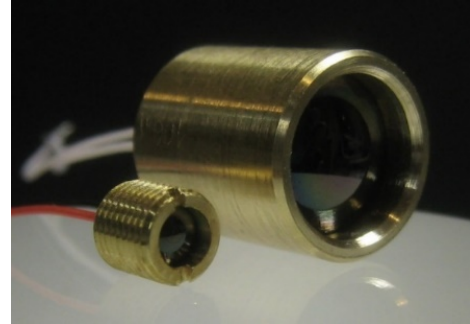
Фотоприемники, работающие в средней ИК-области спектра (3–6 мкм), применяются в тепловидении, тепловизионных системах дистанционного зондирования Земли, оптических газоанализаторах и в низкотемпературных пирометрах. Для многих применений важной характеристикой фотоприёмного устройства является минимальные энергопотребление и размеры, что исключает возможность использования криогенных систем и термоэлектрических охладителей и одновременно требует обеспечения возможности работы фотоприемника при повышенных температурах. Фотодиоды (ФД) на основе  $\text{InSb}$  или  $\text{CdHgTe}$ , работающие в диапазоне длин волн 3–6 мкм, как правило, не могут эффективно работать без криогенного или термоэлектрического охлаждения.

Одним из альтернативных, активно развиваемых в последнее время подходов, является использование эпитаксиальных гетероструктур с фоточувствительной областью из твердого раствора  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ , выращиваемых на подложке  $\text{InAs}$ , в которых при вводе излучения через подложку длинноволновая граница фоточувствительности может составлять от 4 мкм ( $x = 0,08$ ,  $T = 77\text{ K}$ ) до 12 мкм ( $x = 0,4$ ,  $T = 295\text{ K}$ ), а рабочая температура вплоть до 353 K.

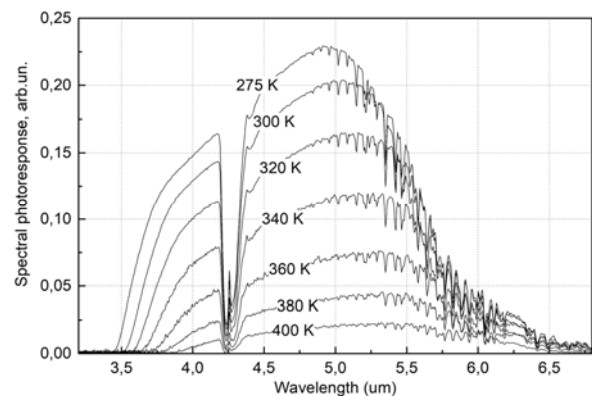
Были исследованы и созданы высокоэффективные ФД флип-чип конструкции планарной геометрии, а также ФД, сочлененные с иммерсионными линзами, со спектром фотоответа в области от 3,5 до 6,5 мкм на основе гетероструктуры  $N\text{-InAsSbP}/\text{InAsSb}_x/\text{P-InAsSbP}$  ( $x \geq 0,2$ ), работающих в интервале температур до 400 K.

Проанализированы спектральные характеристики электролюминесценции и фоточувствительности, вольт-амперные характеристики в широком интервале температур, влияние геометрии чипов в

протяженных многоэлементных фотоприемниках на параметры чувствительности. Показано, что разработка фотоприемников с фоточувствительной областью на основе твердого раствора  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  в области составов  $x \geq 0,2$  перспективна для создания быстродействующих матричных фотоприемников большой размерности, работающих в широком интервале температур в спектральной области 3–6 мкм.



Фотодиоды с иммерсионными линзами диаметром 3,5 и 10 мм

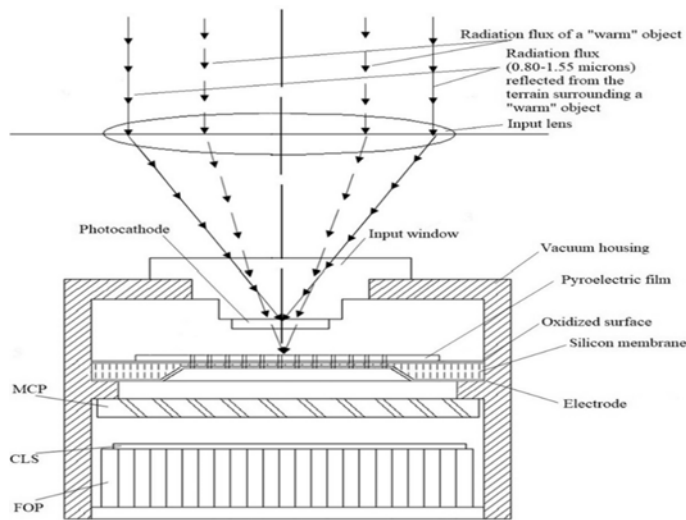


Спектры фоточувствительности фотодиода на основе гетероструктуры  $N\text{-InAsSbP}/\text{InAsSb}_x/\text{P-InAsSbP}$  ( $x = 0,22$ )

Исследование процессов считывания изображений тепловых объектов в приёмнике архитектуры электронно-оптического преобразователя представил **Попов А. В.** (НИУ «Московский институт электронной техники»).

Предложена альтернативная инновационная конструкция одноканального двухспектрального приемника изображений «тепловых» объектов (излучающих в спектральном диапазоне 5–13 мкм), выполненная в архитектуре электронно-оптического преобразователя, осуществляющая распознавание и привязку «теплового» объекта к окружающей местности.

Инновационным для данного приемника изображений является использование пироэлектрической пленки в качестве чувствительного слоя сенсорно-преобразовательного узла, и способа считывания информации о «тепловом» объекте потоком фотоэлектронов, несущих информацию о местности его расположения.



*Схематическое изображение конструкции приёмника изображений тепловых объектов, выполненного в архитектуре ЭОП*

Для реализации процесса корректного считывания картины распределения электрических потенциалов, соответствующей картине распределения температур теплового поля изображения, решается задача согласования величин потенциалов, индуцированных тепловым полем на пироэлектрической плёнке, и энергий фотоэлектронов считывающего потока, несущих информацию об окружающей объект местности. Расчеты электрических полей, потенциалов, и траекторий считывающего потока фотоэлектронов выполнены с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics. В процессе расчетов выполнен поиск оптимальных значений потенциалов на элементах считывающего узла (кремниевой мембране, фотокатоде, входном, выходном электродах МКП), обеспечивающих возможность регистрации и распознавания тепловых изображений объектов в привязке к окружающей местности. В результате расчетов получены оптимальные значения величин потенциалов: 10–15 В – на кремниевой мембране, -1–-2 В – на фотокатоде, 0 В – на пироэлектрической пленке, 100 и 600 В (1100 В для высоковольтных МКП) на входном и выходном электродах МКП, соответственно. Показана необходимость обязательного «сброса» (либо компенсации) начального потенциала на пироэлектрической пленке связанного со спонтанной поляризацией.

О разработке электронно-оптического преобразователя на основе GaAs с беспленочной технологией МКП и импульсным источником питания сделал доклад **Миронов А. В.** (ЗАО «Экран ФЭП», г. Новосибирск).

Современные электронно-оптические преобразователи (ЭОП) III поколения – это системы с параллельным переносом изображения, состоящие из GaAs фотокатода (ФК) с эффективным отрицательным электронным средством, микроканальной пластины (МКП) с ионно-барьерной пленкой

(ИБП) и люминесцентного экрана. Основной особенностью этой конструкции является ИБП на входной поверхности МКП, которая служит для защиты фотокатода от обратного потока ионов, возникающего в процессе работы ЭОП и приводящего к снижению чувствительности фотокатода. Вместе с этим ИБП задерживает часть электронов, испускаемых фотокатодом (до 30%), а ее зарядка приводит к снижению контраста отображаемой информации. Другим негативным последствием применения ИБП является значительное увеличение напряжения между фотокатодом и МКП до 600–800 В и связанное с этим увеличение расстояния между ними, что, в свою очередь, приводит к ухудшению такого параметра как гало.

Используя современные достижения в производстве МКП, на предприятии ЗАО «Экран ФЭП» разработана технология и освоено серийное производство электронно-оптических преобразователей III поколения без использования ионно-барьерной пленки с наработкой более 10000 часов. Применение разработанных ООО «Спецэлектроника-Нск» совместно с ЗАО «Экран ФЭП» серии импульсных источников питания с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) напряжения на фотокатоде, позволило значительно расширить динамический диапазон работы ЭОП III поколения по освещенности вплоть до  $10^3$  лк.

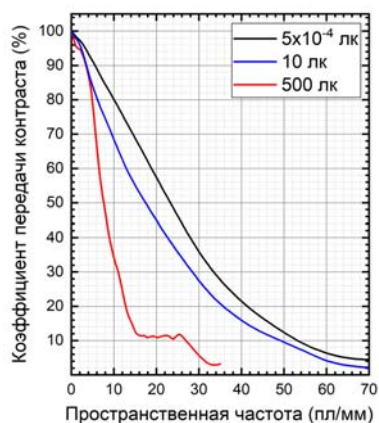


*Работа ЭОП с импульсным источником питания при освещенности > 10 000 лк*

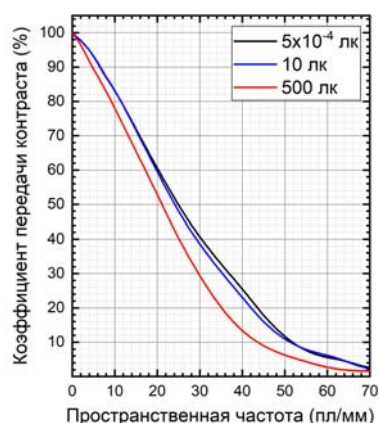


На преобразователях производства ЗАО «Экран ФЭП» получены средние значения отношения сигнал/шум более 36, предела разрешения более 72 пл/мм и гало менее 0,7 мм. Измерены частотно-контрастные характеристики ЭОП III поколения с ионно-барьерной пленкой и без пленки при различных освещенностях в диапазоне от  $10^{-4}$  до 500 лк. Показано, что при использовании стандартного источника питания (с постоянным напряжением на ФК) разрешение ЭОП начинает

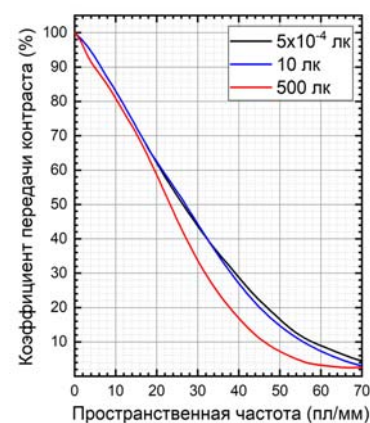
ухудшаться уже при освещенностях порядка 5–10 лк, а при 500 лк оно падает практически в 3 раза. Применение импульсного источника питания на бесплёночных ЭОП III поколения дает возможность не терять в качестве изображения вплоть до 500 лк. Для преобразователей с ионно-барьерной пленкой ШИМ модуляция напряжения на фотокатоде также позволяет расширить динамический диапазон работы ЭОП с незначительным (до 20 %) ухудшением предела разрешения.



а) Классический ЭОП III поколения



б) ЭОП III поколения с импульсным источником питания



в) Бесплёночный ЭОП III поколения с импульсным источником питания

#### Влияние ИБП и источника питания на ЧКХ ЭОП

Представитель филиала АО «ПО «УОМЗ» «Урал-СибНИИОС» (г. Новосибирск) **Фесько А. З.** рассказал о перспективной разработке устройства регистрации данных для тепловизионных систем.

Задача получения и сохранения необработанных тепловизионных данных является весьма востребованной при разработке, настройке и испытании различных тепловизионных приборов и комплексов. Чаще всего возникает задача сохранения тепловизионных видеоданных, вместе с какими-либо дополнительными данными. Был разработан и реализован ряд устройств, однако заложенные в них возможности были исчерпаны, и в рамках дальнейшего развития был разработан прибор следующего поколения.

Основными достоинствами предлагаемого устройства регистрации данных для тепловизионных систем являются: а) увеличенное число каналов регистрации – до трёх каналов, б) за счет модульной конструкции расширен ассортимент каналов приема видео, разработан ряд модулей для приема видео в различных форматах, что для смены формата передачи достаточно заменить один модуль из состава разработанного устройства, в) возможность использования отечественных процессоров.

Поддерживаемые форматы видеоданных могут адаптироваться под конкретную задачу путем модификации встроенного программного обеспечения.

#### Параметры устройства регистрации данных

Входные каналы передачи	Fibre Channel 1Gb	два канала*
	SDI 3G	два канала**
Накопитель информации	SSD SATA-III/PCI-e	до 1 ТБ
Выходной канал передачи	Gigabit Ethernet	один канал

\* один канал Fibre Channel для передачи по коаксиальному кабелю, второй на выбор – коаксиальный кабель / оптоволокно;

\*\* допускается одновременная запись с трёх произвольных каналов – два Fibre Channel и один SDI 3G, либо один Fibre Channel и два SDI 3G.

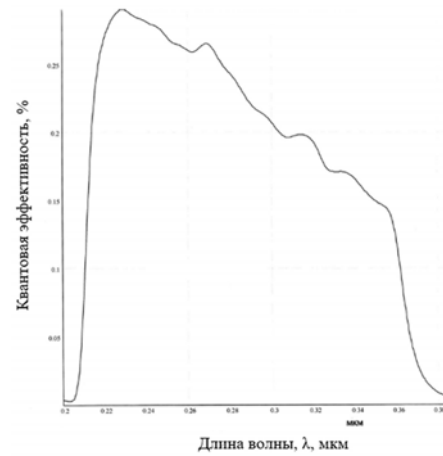
О перспективных разработках в ОАО «НПО «Геофизика-НВ» электронно-оптических преобразователей и фотоприемных модулей для различного диапазона спектра сделал доклад **Балясный Л. М.** «Ультрафиолетовый фотоприемный модуль на основе электронно-оптического преобразователя с фотокатодом GaN/GaAlN на сапфире для космического мониторинга».

Наиболее чувствительными приборами, работающим в т. н. солнечно слепых (т. е. в которых отсутствует солнечное излучение) диапазонах длин волн  $200 \leq \lambda < 290$  нм и видимо-слепых  $200 \leq \lambda < 390$  нм, т. е. на уровне моря на Земле и в ближнем космосе, соответственно являются электронно-оптические преобразователи (ЭОП) и фотоприемные модули (ФПМ), созданные на их основе. Для УФ-области спектра наиболее перспективным материалом является система тройных соединений  $Ga_xAl_{1-x}N$ , в связи с тем, что они являются монокристаллическими прямозонными полупроводниками с шириной запрещенной зоны от 3,4 до 6,2 эВ, что соответствует спектральному диапазону с красной границей от 200 нм (AlN) до 365 нм (GaN). Меняя состав слоя, можно получить предсказуемую форму спектральной характеристики и красную границу фотокатода в зависимости от решаемой задачи.

В настоящее время на фотокатодах GaN был получен квантовый выход до 60 % на отражение и 30 % на 250 нм, 40 % на 240 нм – на пропускание, причем независимо от способа роста эпитаксиальной структуры c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaIn/p-GaN (рост в газовой фазе из металлоорганических соединений (МОС) или в сверхвысоком вакууме методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ)). Спектральная характеристика чувствительности такого фотокатода представлена ниже.

На основе ГЭС оптимизированной конструкции были разработаны и изготовлены фотокатодные узлы c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaIn/p-GaN, сочлененные с титановой оправой с помощью диффузионной сварки, в отличие от фотокатодного узла, изготов-

ленного фирмой Hamamatsu, в котором ГЭС сочленяли с профильным сапфировым диском сплавлением. Были изготовлены ФПМ с аналоговым и цифровым выходом на базе ПЗС-матриц как отечественного, так и зарубежного производства.



Спектральная характеристика ОЭС фотокатода GaN/GaAlN на лейкосапфире на пропускание



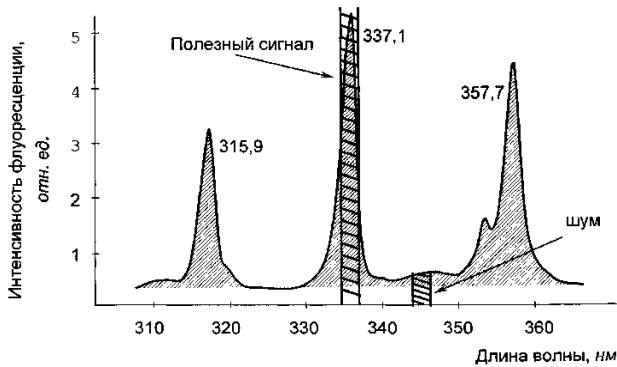
Фотоприемный модуль на основе фотокатода GaAlN

На основе таких ФПМ, работающих в видимом и УФ-диапазоне спектра можно собрать комплексированный двухспектральный прибор для выделения УФ-кластеров в изображении. Такой прибор обеспечивает привязку УФ-изображения дефекта в высоковольтном изоляторе (тлеющего разряда) на фоне изображения участка линии электропередачи (рисунок).



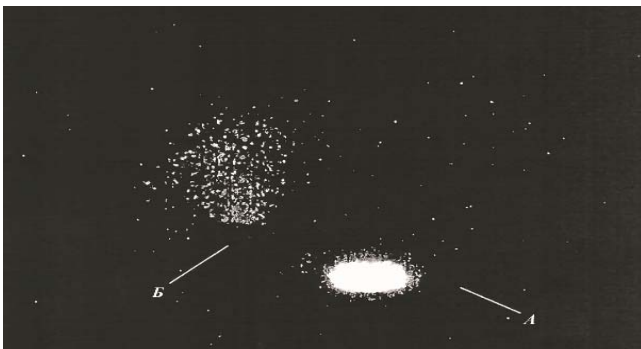
Комплексирование изображений видимого и УФ-диапазона спектров и отображение его на мониторе

Для мониторинга радиационных загрязнений местности можно использовать эффект свечения атмосферного азота, вызванное его ионизацией радионуклидами. Спектр этого свечения показан на рисунке.



Спектр свечения атмосферного азота под действием различных источников радиации

Изображение, полученное с помощью ФПМ приведено на рисунке.



Изображение источников радиации на экране монитора: А — от источника  $\alpha$ -излучения  $^{238}\text{Pu}$  с активностью 100 мКи; Б — от источника  $^{90}\text{Sr}$   $\gamma$ -излучения с активностью 1,35 мКи

Одной из насущных проблем является разработка круглосуточного оптоэлектронного устройства для обнаружения и определения положения пятна лазерного излучения, создаваемого импульсными лазерными целеуказателями (ЛЦУ) — дальномерами, работающими в различных спектральных диапазонах.

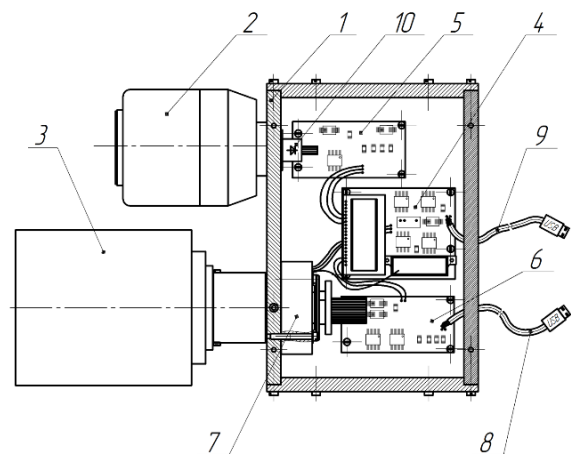
Синхронизация работы лазерного излучателя с фотоприемным устройством позволяет снизить яркость фона в зоне между объектом и приемником на величину, равную скважности стробирующих импульсов, то есть отношению частоты строба и длительности, например, при частоте 20 Гц (типичная частота работы твердотельных лазерных дальномеров с диодной накачкой на длине волны 1,06 мкм и 1,54 мкм) и длительности строба 200 нс, ослабление яркости фона составит  $5 \times 10^7$  раз.

В этом случае только оптоэлектронные устройства, называемые активно-импульсными на основе электронно-оптических преобразователей, работающих в режиме «стробирования», позволяют, обладая «мгновенным» усилением, сохраняющимся независимо от времени открытия затвора ЭОП, увидеть объект.

В ночное время суток такие приборы работают в режиме активно-импульсного прибора ночного видения, а днем — наблюдательного прибора с лазерной подсветкой. Лазерный осветитель и фотоприемное устройство на основе ЭОП с затвором находятся в едином изделии. Управление такими приборами осуществляется электронным способом, т. е. либо от источника питания ЭОП, либо от источника питания лазерного излучателя.

Однако в случае, если излучатель и оптоэлектронное устройство отображения разнесены в пространстве, электронная синхронизация их работы невозможна, и, соответственно, увидеть пятно излучения на объекте также невозможно. Проблема заключается в том, что для задачи обнаружения лазерного излучения от ЛЦУ необходима визуализация объектов, на которые попадает лазерное излучение от ЛЦУ и самого лазерного пятна. Визуализация нужна для определения точности попадания лазерного излучения от ЛЦУ на объект наблюдения и в особенности необходима, в случае если объект, на который направлен ЛЦУ, перемещается в пространстве.

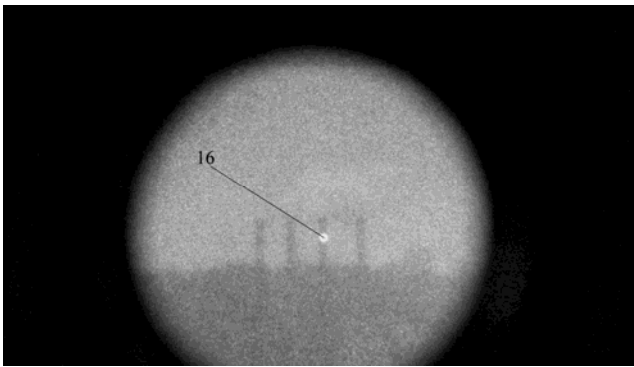
На рисунке представлен общий вид устройства для круглосуточного наблюдения положения пятна излучения на удаленном объекте.



Общий вид устройства для круглосуточного наблюдения положения пятна излучения на удаленном объекте: 1 — корпус; 2 — первый входной объектив; 3 — второй входной объектив; 4 — импульсный источник питания; 5 — плата усилителя; 6 — ПЗС-камера; 7 — ЭОП состыкованный с матрицей ПЗС-камеры; 8 — USB-кабель передачи видеоданных от устройства к ЭВМ; 9 — USB-кабель управления устройством через ЭВМ; 10 — фотоприемник

Такая совокупность признаков позволяет в широком диапазоне освещенностей (днем и ночью) видеть пятно дальномера за счет синхронизации оптоэлектронного устройства отображения путем оснащения этого устройства дополнительным фотоприемником, который, получив оптический отклик отраженного от объекта лазерного светового импульса, запускает с той же частотой и длительностью работу затвора ЭОП. В результате яркость окружающего фона также ослабляется на величину, пропорциональную скважности, вследствие чего и днем, и ночью окружающий фон не мешает наблюдению.

На следующем рисунке показан пример определения пятна лазерного дальномера на трубе ТЭЦ. Расстояние до объекта 7 км.



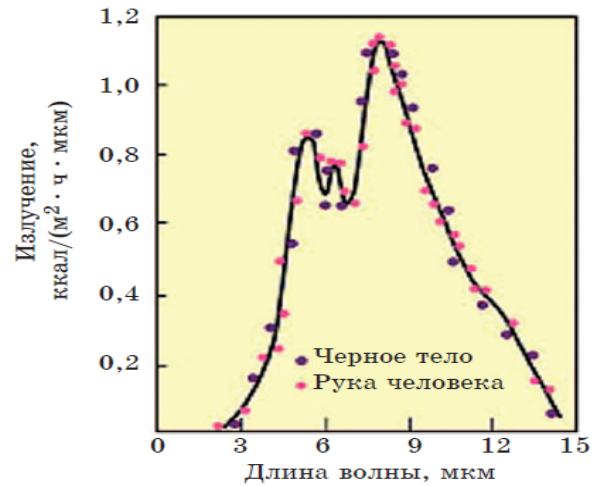
Пример визуализации пятна излучения ЛДУ (1) на объекте (труба ТЭЦ)

Альтернативные системы распознавания образов для искусственного интеллекта на основе ИК-«черноволнового» излучения человеческого тела были представлены Гордеевым А. И. (г. Ульяновск).

Нейросистемы и системы на биометках не являются точными и безошибочными.

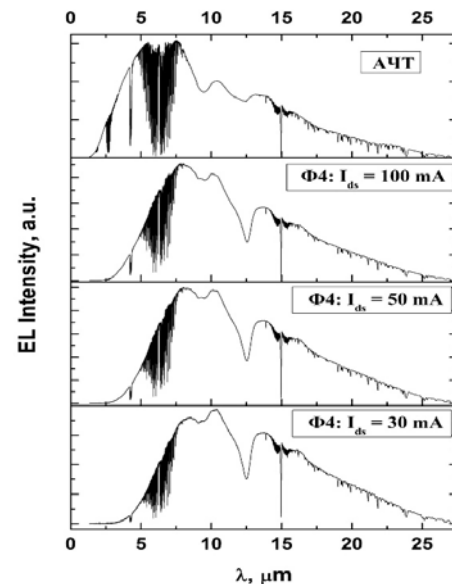
В основе нового метода по системам распознавания образов лежит метод, базирующийся на анализе электромагнитного излучения человеческого тела с длинами волн от  $\lambda \approx 5,0$  мкм (60 Терагерц) до дальнего СВЧ-диапазона с  $\lambda \approx 1 \div 2$  мм (150 ÷ 300 Гигагерц). При этом около 40 % излучения человеческого тела приходится на так называемый «черноволновой» ИК-диапазон с  $\lambda = 5 \div 15$  мкм (60 ÷ 20 Терагерц), показанный на рисунке.

Метод базируется на основополагающих принципах, отраженных в докладе автора на XXV Международной научно-технической конференции по фотозлектронике и приборам ночного видения (Москва, 24–26 мая 2018 г.) в АО «НПО «Орион» – «Неохлаждаемые ИК-фотоприемники в диапазоне длин волн  $\lambda = 3 \div 5$  мкм и  $8 \div 12$  мкм на основе эффекта расщепления запрещенной зоны в LPE  $i\text{-Si}_3\text{GaAsSi}$ -кристаллах».



Спектральное распределение теплового излучения кожи руки и экспериментального черного тела

В основу метода систем распознавания образов положен не только эффект расщепления запрещенной зоны в LPE  $i\text{-Si}_3\text{GaAsSi}$  в сочетании с эффектами Штарка и Франца-Келдыша, но и новый эффект генерации и поглощения в дилатационных структурах Si-3C/SiC в «черноволновом» диапазоне, показанного на рисунке ниже, а также пирозлектрический эффект в композитах AlN/GaN, выращенных методом хлоридно-гидридной эпитаксии на подложках SiC-Si [4], где чувствительность достигала  $\gamma \sim 18 \times 10^{-10}$  С/смК.



Спектры излучения Si-SiC дилатационной структуры, созданной д.ф.-м.н. Кукушкиным С. А. (ИПМаш РАН, С.-Петербург), где  $I_{DC}$  – плотность тока через Si-SiC-структуру

На основе синтеза данных ИК-методов приема черноволнового излучения человеческого тела планируется создание новейших систем распозна-

вания биообразов на тепловых ИК-волнах с  $\lambda = 5\div 15$  мкм для искусственного интеллекта.

### Заключение

Завершая далеко не полный обзор докладов XXVI Международной конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, хочется отметить, что фотоэлектроника – это стремительно развивающееся направление современной физики и техники. Процесс развития и совершенствования фотоэлектроники стремится к бесконечности. Технологии инфракрасной оптоэлектроники и фотоники признаны в мире критическими технологиями, определяющими уровень научного и технологического развития страны. В последнее десятилетие в матричной фотоэлектронике инфракрасного диапазона наметился целый ряд новых направлений и тенденций, связанных с повышением разрешающей способности систем, усовершенствованием методов регистрации сверхслабых оптических сигналов, созданием быстродействующих и многоспектральных систем, формированием инфракрасных 3D-изображений и др. Материалы на основе твердых растворов теллурида кадмия и ртути (КРТ) в настоящее время являются базовым материалом для создания инфракрасных фотоприемных устройств, работающих во всех диапазонах ИК-спектра. Уменьшение шага и повышение формата является всеобщим трендом практически для всех мировых разработчиков и производителей матричных фотоприемных устройств. Вместе с тем, участниками отмечены ключевые моменты развития и применения новых материалов и структур, возникновение новых технологий и конструкций, создание новых источников ИК-излучения, расширение номенклатуры решаемых задач.

По мнению участников конференции, основными тенденциями развития технологий фотосенсорике ИК-диапазона являются:

- разработка и совершенствование методами гетероэпитаксиальной инженерии исходных полупроводниковых фоточувствительных материалов и структур для устойчивого выпуска МФПУ всех спектральных диапазонов, создания двух- и многоспектральных МФПУ, а также МФПУ для гиперспектральных систем, создания МФПУ с различными дополнительными функциональными возможностями, в том числе МФПУ с лавинным усилением, и МФПУ сверхдлинноволнового диапазона ( $>14$  мкм);

- создание ИК-матриц фоточувствительных элементов с уменьшенным шагом элементов вплоть до 5 мкм, обеспечивающих формирование

мегапиксельных матриц с низкой дефектностью и малой взаимосвязью, а также их гибридизацию с кремниевыми мультиплексорами;

- создание кремниевых БИС-считывания для криогенных температур с цифровой предобработкой, малым шагом и числом входных ячеек  $10^6\text{--}10^7$ ;

- разработка типоряда микрокриогенных систем охлаждения, в том числе на промежуточные температуры для «высокотемпературных» МФПУ;
- развитие новых принципов и материалов для регистрации ИК-излучения, включая коллоидные квантовые точки, графен, другие 2D-структуры и т. п.;

- увеличение формата фотоприемных устройств, уменьшение размера пикселя и снижение массогабаритных характеристик, а также стоимости ИК ФПУ;

- разработка процессов выращивания фоточувствительных структур на «альтернативных подложках» большого диаметра;

- дальнейшие исследования перспективных материалов для ИК фотоприёмников на основе множественных  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  квантовых ям;

- развитие изделий фотоники, обусловленное созданием многослойных гетероструктур группы материалов  $\text{A}_3\text{B}_5$  на основе квантово-размерных структур и короткопереходных сверхрешеток;

- активно исследуются для применения в фотосенсорике и находят своё место в промышленных образцах матричных фотоприемников ближнего и коротковолнового ИК-диапазонов нанодисперсные материалы, в первую очередь такие, как коллоидные квантовые точки и двумерные наночастицы слоистых полупроводников;

- использование новых физических принципов приема излучения, в том числе на основе низкоразмерных материалов;

- новым подходом к расширению возможности тепловизионных приемников является применение эффекта поляризации излучения.

Подводя итог, участники высоко оценили работу конференции в целом, как научно-технические результаты, так и общую атмосферу проведения мероприятия, отметив важность обмена опытом в данной области науки и техники.



Прошедшая в ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» XXVI Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения продолжила традицию форумов, не одно десятилетие являющихся эффективной площадкой для обсуждения новых идей и представления достигнутых результатов.

Результаты и материалы конференции лягут в основу работы Секции «Оптоэлектроника и фотоника», которая планируется в рамках Российского Форума «Микроэлектроника-2022», проводимого при поддержке Министерства промышленности

и торговли Российской Федерации 2–8 октября 2022 года (г. Сочи).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Программа XXVI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М.: ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», 2022.
2. Тезисы докладов XXVI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М.: ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», 2022.
3. Презентации докладов XXVI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения.

PACS: 85.60-q

## Current trends in the development of photoelectronics

*(Review of the materials of the XXVI International scientific and technical conference on photoelectronics and night vision devices)*

*I. D. Burlakov<sup>1,2</sup>, S. A. Kuznetsov<sup>1</sup>, and A. Yu. Yakovlev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Orion R&P Association, JSC  
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup> MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA)  
78, Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia

*Received August 28, 2022*

***On May 25–27, 2022, the XXVI International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices was held at the State Scientific Center of the Russian Federation Joint Stock Company NPO Orion.***

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

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-351-380

#### REFERENCES

1. The program of the XXVI International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices. (Orion R&P Association, JSC, Moscow, 2022).
2. Abstracts of the XXVI International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night vision devices. (Orion R&P Association, JSC, Moscow, 2022).
3. Presentations of reports of the XXVI International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices.