

УДК 621.383
EDN: GAVTIJ

PACS: 85.60-q

Основные тенденции и направления современного развития фотоэлектроники

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

И. Д. Бурлаков, В. В. Старцев, А. Ю. Яковлев

29–31 мая 2024 года в Государственном научном центре Российской Федерации
Акционерном обществе «НПО «Орион» состоялась XXVII Международная научно-
техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения.

Ключевые слова: фото- и оптоэлектроника, инфракрасная фотосенсорика, фотоприем-
ник, ИК-техника, фотоприемное устройство, прибор ночного видения, коллоидные
квантовые точки.

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-5-420-439

Введение

XXVII 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, Государственной корпорации «Ростех», Холдинговой компании АО «Швабе», Российского научного фонда, Русского оптического общества, Ассоциации государственных научных центров «Наука», при информационной поддержке журналов «Прикладная физика», «Успехи прикладной физики» и «Фотоника». Конференция имеет статус «Партнерской конференции Российского

форума «Микроэлектроника». В работе конференции приняли участие около 400 ученых и специалистов из 126 организаций и учреждений сферы науки, производства и образования, которые представили на обсуждение 144 доклада.

Открывая конференцию, генеральный директор ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» Вадим Валерьевич Старцев отметил важность проводимого мероприятия, основной задачей которого с первых дней его основания является всестороннее развитие физики фотоэлектрических явлений, создание перспективных фоточувствительных материалов, фотоэлектронных приборов и систем, которые сегодня составляют важнейшие направления современной науки и техники и играют заметную роль во многих отраслях промышленности и обороне.

В приветственном слове Президента Российской академии наук, председателя Программного комитета и Президента Российского форума «Микроэлектроника», академика РАН, доктора технических наук, профессора Геннадия Яковлевича Красникова отмечено, что конференция вносит весомый вклад в формирование поступательного развития фотоэлектроники и фотоники в Российской Федерации.

Бурлаков Игорь Дмитриевич^{1,2}, зам. ген. директора по инновациям и науке, д.т.н., профессор.

Старцев Вадим Валерьевич¹, ген. директор.

Яковлев Александр Юрьевич¹, нач. управления.

¹ АО «НПО «Орион».

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

E-mail: orion@orion-ir.ru

² МИРЭА – Российский технологический университет.

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

Статья поступила в редакцию 1.10.2024

© Бурлаков И. Д., Старцев В. В., Яковлев А. Ю., 2024

В видеообращении генеральный директор ХК АО «Швабе» Вадим Станиславович Калюгин отметил, что технологическое лидерство определено в качестве одной из семи приоритетных целей развития нашей страны и от участников конференции зависит, как поставленная цель будет реализована в области фотоэлектроники и фотоники.

В начале пленарного заседания генеральный директор ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» В. В. Старцев объявил о награждении заместителя генерального директора по инновациям и науке АО «НПО «Орион», доктора технических наук, профессора И. Д. Бурлакова медалью Ассоциации государственных научных центров «Наука» и вручил медаль «За вклад в науку».

Тематика докладов конференции охватила все наиболее актуальные направления развития инфракрасной фотосенсорики, такие как матричные технологии, использование фотоприемников в оптоэлектронной аппаратуре, техника ночного видения, новые фоточувствительные и оптические материалы и структуры, метрология приема оптического излучения. Особое внимание уделено результатам и перспективам развития ряда новых направлений в современной фото- и оптоэлектронике, новым архитектурам полупроводниковых фотосенсоров, особенностям применения сложных полупроводниковых гетероструктур и перспективным оптико-электронным приборам.

На пленарном заседании участники конференции заслушали и обсудили 11 докладов, которые были посвящены современному состоянию и перспективам развития оптико-электронных систем и фотоприемных устройств. На пяти секционных заседаниях по тематическим направлениям «Твердотельная фотосенсорика», «Системы тепловидения, системы наведения, приборы ночного видения», «Системы и методы измерений», «Технология изготовления фотоприемных устройств», «Материалы фотосенсорики и методы их получения» представлено 65 устных и 68 стендовых докладов. В докладах была представлена широкая палитра научно-технических исследований в современной фото- и оптоэлектронике и результатов разработок фотоприемных устройств, ИК-систем и фоточувствительных материалов.

В целях увеличения эффективности научной работы, обмена научно-технической информацией и повышения уровня научно-технических разработок в области фотоэлектроники, тепловидения и систем ночного видения в рамках конференции проведена выставка научно-технических достижений, на которой была представлена продукция предприятий – участников конференции.

Пленарное заседание «Современное состояние и перспективы развития фотоэлектроники»

В докладе заместителя генерального директора по инновациям и науке АО «НПО «Орион», д.т.н., профессора И. Д. Бурлакова «Современное состояние и направления развития фото- и оптоэлектроники в ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» отмечено, что АО «НПО «Орион» успешно преодолел порог 30-летия со дня присвоения ему статуса Государственного научного центра Российской Федерации постановлением Правительства Российской Федерации от 5 июня 1994 г. № 649, полностью оправдав идею создания научных организаций нового типа для сохранения ведущих научных центров мирового уровня, быстрого развития научного потенциала страны в области фундаментальных и прикладных исследований и подготовки высококвалифицированных научных кадров, воплотившуюся в Указе Президента Российской Федерации от 22 июня 1993 г. № 939.

В докладе рассмотрены основные тенденции развития современных технологий фотоэлектроники и полупроводниковых фоточувствительных материалов для инфракрасных областей спектра, а также современное состояние и основные направления развития фото- и оптоэлектроники в ГНЦ РФ АО «НПО «Орион».

Одними из основных глобальных тенденций инфракрасной фотосенсорики продолжает оставаться разработка и совершенствование:

– одно- и многоспектральных охлаждаемых матричных фотоприемных устройств (МФПУ), в том числе третьего поколения мегапиксельных форматов, повышающих вероятность обнаружения и распознавания объектов и другие тактико-технические характеристики систем;

– фоточувствительных гетероэпитаксиальных полупроводниковых структур различной архитектуры с разными функциональными слоями (xVn, T2SL и др.), позволяющих создавать МФПУ с повышенными основными фотоэлектрическими и эксплуатационными характеристиками, в том числе с повышенной относительно «азотной» рабочей температурой охлаждения, обеспечивающей снижение весо-габаритных параметров и потребляемой мощности;

– твердотельной фотоэлектроники коротковолнового ИК-диапазона для области спектра 1–3 мкм как на основе традиционных структур с активными слоями InGaAs и КРТ, так и с активными слоями из коллоидных квантовых точек;

– сверхпротяженных фотоприемных устройств на основе стыкуемых ВЗН-модулей с количеством каналов более 10 тысяч и числом стадий ВЗН накопления 8–10, а также крупноформатных матриц (до 6кx6к элементов) коротковолнового, средне- и длинноволнового ИК-диапазонов для космических применений.

Среди наиболее важных достижений последнего времени следует отметить создание в ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» научно-технических и конструктивных решений при создании и освоении инновационных промышленных технологий:

– МФПУ на основе фотодиодов из антимонида индия на средневолновую область ИК спектра 3–5 мкм формата 640×512 элементов (шаг 15 мкм) с формирователем сигналов изображения;

– малогабаритных ИК камер коротковолнового спектрального диапазона на основе матричных фотосенсоров из InGaAs для оборонных и гражданских применений в промышленности, медицине, искусствоведении, на транспорте и др.;

– оптико-электронных модулей (ОЭМ) средневолнового ИК диапазона спектра на основе отечественного МФПУ формата 640×512 элементов, в том числе с вариообъективом и электронным блоком обработки, формирующим видеосигнал тепловизионного изображения. ОЭМ могут использоваться для решения различных задач, таких как охрана особо важных объектов и акваторий, контроль утечек тепла, вождение транспортных объектов в условиях плохой видимости и т. п.;

– многоядных ИК ФПУ на основе КРТ, обеспечивающих работу в режиме ВЗН и внедрённых в оптико-электронную аппаратуру космического базирования для решения специальных и гражданских задач. Информация о поверхности и происходящих процессах в атмосфере, получаемая аппаратурой в виде изображений полусферы Земли в различных диапазонах ИК области спектра, обладает новым, ранее недостижимым качеством. Это позволило впервые в России создать группировку космических аппаратов непрерывного наблюдения для решения задач гидрометеорологии, а также информационного обеспечения экологии, хозяйственной и транспортной деятельности арктического региона. Аналогичная аппаратура используется для обнаружения лесных пожаров, оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций.

Проводятся исследования и осуществляются разработки нового материала для МФПУ на основе коллоидных квантовых точек.

В заключении отмечено, что в сложившейся сложной геополитической обстановке для достижения необходимого уровня национальной безопасности и обороны страны значительно возросла роль инфракрасной фото- и оптоэлектроники, обеспечивающей возможности и тактико-технические характеристики практически всех видов ВВСТ. Фото- и оптоэлектроника также широко используется в науке, промышленности, космической и других отраслях.

В научном обзоре главного конструктора по программному и перспективному развитию ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», д.ф.м.н., профессора В. П. Пономаренко «Квантовая фотосенсорика и материалы ограниченной размерности» представлен анализ архитектур, методов получения и основных свойств фотонных сенсоров на основе структур ограниченной размерности из соединений элементов II, IV и VI групп Периодической таблицы Д. И. Менделеева и сформулированы научно-технические проблемы, решение которых должно существенно ускорить развитие инфракрасной фотосенсорики.

Фотосенсорика на основе материалов и структур ограниченной размерности в последнее десятилетие стала одним из наиболее динамично развивающихся направлений ис-

следований по созданию устройств для регистрации электромагнитного излучения инфракрасного диапазона.

К настоящему времени различными технологическими методами удалось синтезировать двумерные моноатомные 2D-кристаллы на основе элементов IV группы таблицы Д. И. Менделеева, такие как германен (Ge), силицен (Si), борофен (B), станен (Sn), фосфорен (P) и др. В ряде работ проанализирована, или уже экспериментально показана, возможность получения 2D-кристаллов на основе карбидов, оксидов, хлоридов, нитридов, моно- и ди- и трихалькогенидов переходных металлов, бинарных и даже тройных соединений. К настоящему времени исследования некоторых из них вышли на уровень разработок промышленной технологии производства.

Многообещающим направлением исследований остаются попытки использовать различные 1D- и 2D структуры и их комбинации для создания новых микро- и нано-фотоэлектронных устройств, в том числе на гибких подложках.

В 2020 году на мировом рынке было представлено семейство неохлаждаемых инфракрасных камер, работающих в диапазоне спектра от 0,4 мкм до 2,0 мкм на основе матричных барьерных структур из ККТ, включая мегапиксельные форматы 1920×1080 и 1280×1024, изготовленные с шагом 15 мкм.

По количеству фоточувствительных элементов эти фотосенсоры уже сравнялись с матричными приборами на основе эпитаксиальных 3D слоев InGaAs, отличаясь от них существенно более простой технологией и низкой стоимостью. Поиск новой элементной базы для матриц на основе структур с ограниченной размерностью интенсивно проводится и в последние годы.

В развитие этой темы к.х.н. В. С. Попов (ГНЦ РФ АО «НПО «Орион») представил результаты работ по исследованиям, направленным на создание нового поколения ИК-фотосенсорики на основе коллоидных квантовых точек (ККТ). Отмечено, что использование ККТ существенно упрощает изготовление, снижает ограничения на шаг фоточувствительных элементов матриц и удешевляет технологию производства, что способствует широкому внедрению таких ИК-матриц в различные технические системы. Одним из

достоинств ККТ является простота управления областью спектральной чувствительности путем изменения их размеров, что в свою очередь обеспечивается путем варьирования режимов синтеза ККТ.

Приведены основные параметры лучших образцов оптоэлектронных приборов на основе структур из ККТ и проанализированы ключевые тенденции развития данного направления.

В последнее время при разработках и изготовлении матричных фотоприемных устройств на основе ККТ наибольшее распространение получили две архитектуры – с использованием энергетического барьера гетероперехода на контакте слой ККТ PbS/фуллерен или энергетического барьера на контакте двух слоев ККТ PbS с электронным и дырочным типами проводимости. В обоих случаях стыковка фоточувствительной области с кремниевой СБИС считывания и предварительной обработки фотосигналов может осуществляться без использования индиевых микроконтактов.

В ходе проведенных работ коллективом из ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» и МФТИ предложена и исследована усовершенствованная архитектура матричного фоточувствительного элемента на основе ККТ PbS. В качестве верхнего контакта впервые использован слой квантовых нитей из серебра, прозрачный для излучения в области длин волн 0,4–2,0 мкм.

В докладе проведен полный обзор архитектур, методов получения и основных свойств фотонных сенсоров на ККТ соединений, описаны особенности синтеза, роль лигандов и морфологии ККТ при создании фотосенсоров. Рассмотрены структурные схемы фоторезистивных, фотодиодных и фототранзисторных элементов на основе ККТ из HgTe, HgSe, PbS, PbSe, обладающих фоточувствительностью в различных спектральных диапазонах.

Развитие технологии охлаждаемых матричных ИК фотоприемников в ИФП СО РАН в своем докладе представил д.ф.-м.н. М. В. Якушев, заместитель директора по научной работе Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Докладчик акцентировал внимание на том, что в настоящее время подавляющее большинство охлаждаемых ИК фотоприемников изготавливаются на основе двух типов полупроводниковых струк-

тур. Это структуры HgCdTe (КРТ), выращиваемые на согласованных или на альтернативных подложках, и сложные полупроводниковые структуры на основе соединений A_3B_5 . Основным преимуществом КРТ (по сравнению со структурой A_3B_5) в том, что эта структура может быть оптимизирована для использования в широком диапазоне ИК-спектра 1–30 мкм и в диапазоне температур 30–300 К, т. е. она обладает так называемым «правильным» коэффициентом зависимости запрещенной зоны от температуры.

В ИФП СО РАН разработано и изготовлено уникальное российское оборудование для выращивания КРТ методом МЛЭ. Ключевым моментом в разработанной ИФП СО РАН технологии является решение проблемы выращивания фоточувствительных слоев КРТ на кремниевой подложке (Si), что снимает ограничения на формат ИК ФП и его стойкость при циклическом охлаждении до температуры жидкого азота, а также значительно удешевляет процесс выращивания. В настоящее время матричные ИК ФП разрабатываются и изготавливаются на основе гетероструктур HgCdTe/Si.

Наибольший прогресс достигнут в области фотоприемников для спектрального диапазона 3–5 мкм. В ИФП СО РАН освоена технология средневолновых фотоприемников с размером пикселя 15 мкм, не уступающих по своим параметрам зарубежным аналогам. Фотоприемники имеют чувствительность 15–20 мК, дефектность менее 0,5 % и возможность работать при температурах 110 К и выше. Для диапазона 8–10 мкм освоена технология фотоприемников с размером пикселя 30 мкм. Длинноволновые фотоприемники имеют чувствительность 30–35 мК, дефектность 1–2 % и работают при температурах 80 К.

Еще одним направлением развития ИК ФПУ длинноволнового диапазона является разработка детекторов на основе напряженных короткопериодных сверхрешеток 2-го рода (CP2P) InAs/GaSb и InAs/InAsSb. Важнейшим отличием материала сверхрешеток InAs/GaSb и InAs/InAsSb от КРТ являются большие эффективные массы электронов и дырок, значительно подавляющие туннельные токи и Оже-рекомбинацию, что обуславливает перспективность сверхрешеток для изготовления ИК ФПУ при повышенных рабочих температурах.

В продолжение данной темы к.ф.-м.н. Н. Н. Михайлов (ИФП СО РАН) рассказал о результатах проведенных учеными ИФП СО РАН и Томского государственного университета исследований процессов роста низкоразмерных структур с $Hg_{1-x}Cd_xTe/Hg_{1-y}Cd_yTe$ квантовыми ямами (КЯ), встроенными в сложные гетероструктуры методом МЛЭ, на уникальной научной установке «Обь-М» с высокоточным контролем *in-situ* состава x и y (~ 0,0005 мол. дол.) и толщины (~ 0,5 нм) с использованием высокоскоростного лазерного эллипсометра и анализом распределения состава по толщине с использованием метода «эффективной подложки».

Фундаментальные физико-химические исследования процессов роста, легирования и механизмов образования дефектов позволили создать альтернативную подложку CdTe/ZnTe/GaAs, нелегированные и легированные слои твердого раствора HgCdTe высокого качества. В процессе исследований рассмотрены особенности роста структур с одиночными, двойными и множественными $Hg_{1-x}Cd_xTe/Hg_{1-y}Cd_yTe$ КЯ. Толщина варьировалась от 4 нм до 1000 нм и состав изменялся от чистого HgTe до $y \sim 0,18$. Проведены расчеты и выполнены эксперименты для определения зонной структуры и энергетического положения уровней размерного квантования из измерений спектров поглощения и фотопроводимости в температурном интервале 77–298 К.

Данные результаты показали возможность создания детекторов ИК-излучения в интервале 2–18 мкм. Длинноволновые ($\lambda_{1/2} = 14$ мкм) фотосопротивления на структурах с множественными КЯ имеют фотоэлектрические параметры, сравнимые с аналогичными на основе объемного КРТ. На выращенных структурах проведено большое количество исследований электрофизических свойств разных структур с прямозонным и инвертированным зонными спектрами. Получены данные параметров 2D и 3D топологических изоляторов (ТИ), дираковских материалов, плазмонных структур и т. д.

О состоянии и перспективах создания в АО «ЦНИИ «Электрон» кремниевых фотоприемников, освещаемых с обратной стороны подложки (back-side), в своем докладе рассказал к.т.н. С. С. Татаурщиков (АО «ЦНИИ

«Электрон»). Отмечено, что современные оптико-электронные системы, использующие кремниевые фотоприемники, требуют улучшения точностных характеристик, связанных с увеличением формата фотоприемников и повышением их квантовой чувствительности в широком спектральном диапазоне, и особенно в УФ области спектра. Радикальным решением проблемы является освещение фотоприемника с обратной стороны подложки. При этом, за счет отсутствия поликремниевых электродов на пути распространения света, может быть достигнута максимальная квантовая эффективность (не менее 80 % в максимуме спектральной чувствительности) и наиболее широкий спектральный диапазон (200–1000 нм).

В АО ЦНИИ «Электрон» проведена разработка технологии изготовления ПЗС матриц, освещаемых с обратной стороны подложки, которая может быть успешно распространена и на КМОП фотоприемники. Разработана технология создания матричных ПЗС с обратной засветкой первого типа с ограниченным размером формата матрицы (до 20×20 мм). Благодаря высокой квантовой чувствительности в УФ-области и квантовой эффективности в максимуме до 94 %, такие сенсоры идеально подходят для биомедицинских применений, естественных наук, астрономии, криминалистики.

Перспективные технологии приборов оптического, инфракрасного и миллиметрового диапазона в Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ» представил в своем докладе д.т.н., доцент А. Г. Паулиш (ИФП СО РАН «КТИПМ»). Путем исследований найден метод расчета твердотельного широкоспектрального пятицветного апохромата, основанный в трехмерном расширении двухмерной диаграммы частных дисперсий каталога стекол Герцбергера и автоматическом поиске стекол, лежащих на линии, соединяющей выбранную пару стекол с заданной точностью. В ходе исследований апробирован разработанный ранее субТГц эллипсометр в задачах поверхностной инженерии при изучении микрогетерогенных дисперсионных систем, в частности, в бесконтактной диагностике авиационных углепластиков и жаропрочных керамических покрытий для газовых турбин.

В рамках работ по улучшению дальности действия тепловизионного прибора с использованием мехатронных систем начаты разработки объектива с двумя фиксированными полями зрения, включающем узлы мехатроники для позиционирования оптических компонентов. Специально созданная оптическая схема позволила провести исследование работы главных механических узлов оптического тракта с учётом изменения температуры и требований к временным интервалам при смещении оптических компонентов.

Применение оптико-телевизионной лазерной активно-импульсной системы (АИС) технического зрения робототехнических комплексов (РТК) воздушного, наземного и подводного применения в своем докладе представил Л. М. Балясный (АО «НПО Геофизика-НВ»). Отмечено, что в последние годы широкое распространение получили АИС на основе ЭОП. АИС позволяет наблюдать удаленные объекты в сложных метеорологических условиях – при ярких засветках, тумане, в морозящий дождь и снег, а также в сильно поглощающих и рассеивающих средах, например, в воде. Метод активно-импульсного видения позволяет отсеять излучение обратного рассеяния и резко повысить контраст в изображении объекта. Дополнительно метод позволяет еще больше повысить контраст за счет отсечения изображения фона. При этом яркость фона становится ниже пропорционально скважности импульсов стробирования затворным промежутком ЭОП. Для этого приемник закрывается на период времени, когда возвращается световой импульс, отраженный от всех нежелательных для наблюдения объектов, а открывается только тогда, когда возвращается световой импульс, отраженный только от объектов наблюдения. Затем приемник опять закрывается, и цикл повторяется. Таким образом, на приемник поступает визуальная информация только об истинных объектах наблюдения. В АИС, предназначенных для наблюдения за удаленными объектами, прибор оснащается светосильным длиннофокусным объективом и двумя полупроводниковыми лазерными излучателями. Были получены дальности обнаружения и распознавания объектов (человек, препятствия, автомобиль и т. п.) на расстояниях до 3 км. Применение АИС актуально в

условиях полета, когда на предельно низких высотах в ночное время очень остро встает вопрос, например, о заблаговременном обнаружении проводов и других препятствий, которые могут оказаться на пути.

Использование АИС приобретает огромный смысл в подводных системах видения, когда каждый метр дальности видимости из-за сильного поглощения излучения как естественного, так и лазерного в воде, достигается с огромным трудом, кроме того, существует значительное рассеяние излучения на взвеси и планктоне. В подводных АИС используются мощные твердотельные АИГ:Ег лазеры с диодной накачкой, работающие на второй гармонике излучения лазера на длине волны 527 нм с длительностью импульса 10 нс. Длительность стробирующих импульсов также значительно короче, чем для АИС, работающих на воздухе и составляет не более 20 нс.

В докладе д.ф.-м.н. Ю. П. Яковлева (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН) были представлены исследования генерации тока в фотодиодах Шоттки Pd/InP в атмосфере водорода. Обнаружено новое явление – генерация тока в структурах Pd/InP, помещенных в водородную среду. Обнаружение этого явления связано с проведенными работами по исследованию сенсоров водорода на основе диодов Шоттки. В этих работах изучались ВАХ структур Pd/InP и влияние водорода на их свойства при приложении внешнего напряжения. В этой работе также использовался диод Шоттки на основе структуры Pd/InP с очень тонким палладиевым слоем толщиной 25 нм.

В результате проведенных исследований создан водородный генератор тока на основе диода Шоттки Pd/InP с нанослоями Pd толщиной 10–40 нм. Исследованы генерация токов в диодах Pd/InP и изменение сопротивления слоев палладия на стеклянных подложках, помещенных в газовую среду, содержащую водород. Предполагается, что при контакте водорода с палладиевым слоем происходит ионизация атомов водорода с образованием протонов и электронов, что приводит к изменению сопротивления палладиевого слоя. В случае диода Шоттки Pd/InP вновь образованные электроны и протоны разделяются на барьере Шоттки и создают электрический ток

в короткозамкнутой системе. Величина тока будет зависеть от концентрации водорода в системе и площади диода Шоттки.

Об опыте АО «МЗ «САПФИР» в разработке охлаждаемых фотоприемных устройств, предназначенных для регистрации ИК-излучения средне- и длинноволнового диапазона, а также систем криостатирования, рассказал в своем докладе к.ф.-м.н. В. В. Карпов (АО «Московский завод «САПФИР»).

Были представлены:

– многоэлементные и матричные ФПУ на основе вакуумных или газонаполненных криостатируемых корпусов и газовых криогенных машин (ГКМ), предназначенные для тепловизионной аппаратуры различного назначения;

– радиационно охлаждаемые ФП для многозональных сканирующих устройств малого разрешения (МСУ-МР) космических комплексов (КК) «Метеор», «Метеор-М» и «Метеор-МП»;

– опытные образцы ФП для Фурье-спектрометра ИКФС-3 КК «Метеор-МП»;

– серийные быстродействующие ФП и ФПУ, а также дроссельные микрохолодильники к ним;

– ФП с термоэлектрическим охлаждением для аппаратуры различного назначения.

Рассмотрены технологические возможности создания систем криостатирования (СК) для аппаратуры космического базирования с использованием одной или нескольких ГКМ разнесенного или моноблочного типа, а также ГКМ с пульсационной трубой; совершенствования СК для быстродействующих ФП и ФПУ; разработки моноблочных ГКМ в рамках программы импортозамещения для СК; исследования новых конструкционных материалов, предназначенных для изготовления СК ФПУ различного назначения.

В докладе к.х.н. И. А. Шуклова (Московский физико-технический институт) были освещены результаты исследований в области получения коллоидных квантовых точек селенидов и теллуридов с использованием новых прекурсоров халькогенов. Отмечено, что селениды и теллуриды свинца и ртути (HgTe, HgSe, PbSe, PbTe) обладают шириной запрещенной зоны от 0 эВ для HgTe до 0,32 эВ для PbTe объемных материалов при 300 К.

Эти свойства дают тонким пленкам на основе ККТ халькогенидов потенциал использования в фотодетекторах диапазона от ближнего до среднего ИК для HgSe/PbSe и даже дальнего ИК для HgTe. Для практического применения требуются методы получения ККТ данных селенидов и теллуридов для разных диапазонов спектра с хорошей коллоидной стабильностью и узким распределением по размерам.

Как правило, ККТ селенидов и теллуридов получают с использованием прекурсоров теллура и селена на основе триоктилфосфина (ТОФ). Разработан ряд альтернативных прекурсоров этих халькогенов. В частности, для синтеза ККТ HgTe был разработан прекурсор теллура – раствор трициклогексилфосфин теллурида. Он более удобен в использовании и дает более воспроизводимые результаты в синтезе наночастиц, чем ТОФ. С его помощью получены образцы ККТ HgTe с максимум экситонного пика от 1380 нм до 2800 нм. Синтез ККТ PbTe с морфологией нанокубов также возможен с его помощью.

Синтез ККТ селенидов свинца и ртути возможен с использованием реагента на основе селена и децена-1. Этот реагент стабилен к окислению на воздухе. Исследование растворов теллура в третичных фосфинах с помощью ЯМР и DFT показало, что для них характерен активный обмен теллуrom между фосфинами. Также трициклогексилфосфин теллурид может быть использован в синтезе ККТ PbTe, CdTe или ZnTe. Предложен новый безфосфиновый прекурсор на основе децена и элементарного селена. С его помощью получены ККТ HgSe.

Секция «Твердотельная фотосенсорика»

Секция «Твердотельная фотосенсорика» открылась обзорным докладом к.т.н. А. Е. Мирюфанченко (ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»), посвященном развитию и применению матричных инфракрасных фотоприемных устройств на основе антимонидов, работающих в средневолновом (MWIR) и длинноволновом (LWIR) ИК-диапазонах спектра при повышенных рабочих температурах. Отмечено, что материалы на основе элементов A_3B_5 , содержащие сурьму, по своей природе обладают прочными ковалентными связями, что обеспе-

чивает ИК МФПУ на их основе лучшие характеристики по однородности, стабильности, масштабируемости, воспроизводимости. Они значительно более устойчивы к привносимым в процессе производства дефектам, что делает их предпочтительным выбором, когда речь идет о крупносерийных и коммерчески выгодных производствах. Технологическими вызовами при производстве таких устройств являются снижение шага элементов и увеличение формата матриц, разработка надежных методов формирования фоточувствительных элементов с последующей пассивацией и внедрение цифровых БИС считывания.

В развитие этой темы П. В. Власов (ГНЦ РФ АО «НПО «Орион») выступил с докладом о результатах исследований низкочастотных шумов в МФПУ на основе антимонида индия с различной кристаллографической ориентацией. В серийных МФПУ с кристаллографической ориентацией InSb (100) наблюдается низкочастотный шум, проявляющийся через определенное время после включения МФПУ в виде одиночных пикселей с пониженным уровнем сигнала. Проведены исследования МФПУ формата 640×512 элементов на основе антимонида индия с кристаллографической ориентацией (111) с точки зрения наличия «темных точек», а также количества мерцающих, дрейфующих и взрывных пикселей после двухточечной коррекции неоднородности, обладающих шумовыми характеристиками, типичными для избыточного низкочастотного шума. Полученные данные показывают, что с точки зрения пикселей с избыточным низкочастотным шумом МФПУ формата 640×512 элементов на основе антимонида индия с кристаллографической ориентацией (111) значительно превосходят МФПУ с ориентацией (100). Также в данных МФПУ не обнаружен эффект «темных точек». В результате исследований установлены основные закономерности низкочастотного шума типа «темные точки» для InSb ориентации (100). Увеличение концентрации легирующей примеси в слитках позволяет уменьшить темновой ток и одновременно подавить эффект «темных точек». С точки зрения пикселей с избыточным низкочастотным шумом МФПУ формата 640×512 элементов на основе антимонида индия с кристаллографической ориентацией (111) значительно превосходят МФПУ

с ориентацией (100). Также в них отсутствует эффект «темных точек».

В развитие темы коллоидных квантовых точек (ККТ) Г. Н. Панин (Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН) выступил с докладом об исследованиях фотомемристорных сенсоров для автономных систем зрения на основе низкоразмерных материалов. Отмечено, что в ходе исследований были рассмотрены фотомемристоры на основе двумерных материалов, таких как графен, оксид графена, дисульфиды переходных металлов и слоевых квантовых точек. Показано, что НР материалы можно использовать для интеллектуальной визуализации в широком УФ ИК-диапазоне с предварительной обработкой информации в самом детекторе. Умные детекторы со встроенными нейронными сетями, подобными сетчатке, могут быть изготовлены из гибких биосовместимых НР материалов и использоваться в самых разных приложениях.

Научную разработку по этой тематике – фотоприемник SWIR излучения на основе ККТ PbS и линейного фоточувствительного прибора с переносом заряда, представил С. Н. Челышков (АО «ЦНИИ «Электрон»). Отмечено, что на данный момент основным материалом ККТ в SWIR фотоприемниках являются ККТ на основе PbS. Связано это с высокой устойчивостью к окислению и оптимальным диапазоном перестройки края собственного поглощения (до длины волны 2,6 мкм).

Перспективным направлением в области фотодетекторов на основе ККТ является их сочленение с фоточувствительным прибором с переносом заряда (ФППЗ), имеющим в своей конструкции фоточувствительные элементы, содержащие фотодиоды. Это могут быть матричные фотоприемники, построенные по методу межстрочного переноса, а также линейные фотоприемники с разделением областей переноса и накопления заряда.

Предложена конструкция линейных фоточувствительных приборов с переносом заряда (ЛФППЗ), состоящих из 1000–12000 фотодиодов, схемы накопления и считывания заряда. Под действием падающего излучения в кремниевых фотодиодах генерируются электрондырочные пары, которые затем разделяются на p - n -переходе с переносом неосновных но-

сителей заряда в секции накопления, где для них индуцируются потенциальные ямы. Затем неосновные носители заряда собираются на выходном устройстве с помощью схемы считывания заряда. Вместе с тем, имеются технологические сложности создания качественного гетероперехода ККТ/Si, в том числе, наличие межфазных дефектов, образование высоких потенциальных барьеров, транспорт носителей заряда в ККТ.

Важную и актуальную тему, касающуюся оперативного восстановления работоспособного состояния оптико-электронных систем (ОЭС), осветил в своем докладе представитель государственного заказчика М. И. Конча (ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России). Он отметил, что в настоящее время при ремонте образцов ВВСТ, стала актуальной проблема замены неисправных фотоприемных модулей (ФПМ), входящих в состав ОЭС, являющихся неотъемлемой частью высокоточного оружия. В ряде случаев отечественные образцы ОЭС укомплектованы ФПМ иностранного производства, которые в условиях санкций закупить невозможно. Для оперативного восстановления работоспособного состояния ОЭС предлагается производить ремонт ФПМ. При этом следует учитывать, что ФПМ относятся к электронной компонентной базе, к которой в соответствии с комплексом государственных военных стандартов (КГВС) «Климат» требования по ремонтпригодности не предъявляются. Соответственно ФПМ являются невозможными для восстановления и неремонтируемыми изделиями.

Однако существует практика восстановления параметров и ремонта электровакуумных приборов сверхвысоких частот (ЭВП СВЧ) (магнетроны, клистроны и др.), для чего проводится реставрация указанных приборов, связанная с их разборкой и заменой узлов. Предлагается данный подход распространить на ФПМ. Опыт проведения реставрации различных типов ЭВП СВЧ отечественного и иностранного производства показал техническую состоятельность и экономическую целесообразность проведения таких работ. Ремонт ФПМ позволит решить задачу по оперативному восстановлению ОЭС. Такие работы могут проводиться на ФПМ отечественного и иностранного производства, возвращенных из

сферы эксплуатации, в случае технико-экономической целесообразности проведения таких работ.

Для решения вопроса своевременного и качественного обеспечения ремонта ФПМ, включая условия для проведения реставрационных работ, технические требования, методы технической диагностики состояния приборов, обеспечению и контролю качества целесообразно регламентировать в общих технических условиях на ФПМ, разработка которых планируется в рамках реализации организационно-технических мероприятий по внедрению КГВС «Климат-8». Альтернативным решением этому может стать разработка отдельного государственного стандарта по реставрации ФПМ.

Представитель Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН к.ф.-м.н. М. А. Ременный выступил с докладом, посвященным изучению поверхностно облучаемых фотодиодов для спектральной области $\lambda = 2\div 4,5$ мкм на основе ДГС N-InAsSbP/InAs(Sb)/P-InAsSbP, выращенных на подложках n^+ -InAs (100) методом ЖФЭ. Проведены разработки и исследования фотоприемников с вводом излучения через тонкий слой P-InAsSbP фоточувствительных в спектральной области $\lambda = 2\div 4,5$ мкм и работающих в интервале температур 200–500 К. Показано, что предложенные решения по конструкции эпитаксиальной структуры и фотоприемника на ее основе обеспечили достижение значений токовой чувствительности и обнаружительной способности на длине волны 3,3 мкм $S_i = (1,6\div 1,75)$ А/Вт, $D^* = 1,5 \times 10^{10}$ см·Гц^{1/2}/Вт (22 °С).

О состоянии исследовательских работ по контролю плотности дефектов QWIP гетероструктур рассказал А. Л. Дудин (АО «Светлана-Рост»). QWIP гетероструктуры выращиваются на отечественных установках МЛЭ, разработанных и изготовленных компанией АО «НТО» (С.-Петербург). Это установки серии STE35, позволяющие проводить ростовые процессы на подложках диаметром до 100 мм.

Из выращенных QWIP гетероструктур изготавливаются широкоформатные матрицы длинноволнового ИК-диапазона, фоточувствительные в спектральной области 8–10 микрон. Подсчет общей плотности дефектных пикселей дает величину не более 100 см⁻² или менее

0,1 % всех пикселей матрицы. Из сравнения плотности ростовых дефектов и плотности дефектных пикселей можно сделать вывод, что не все ростовые дефекты приводят к закорачиванию пикселей. Вид и природа ростовых дефектов, приводящих к закорачиванию пикселей ИК-матрицы, требуют дальнейшего изучения, что позволит уменьшить коэффициент запуска гетероструктур для последующих постростовых операций и, следовательно, снизить себестоимость ИК-матриц.

С обзором исследований спектральных и фотоэлектрических характеристик МФПУ средневолнового ИК-диапазона на основе барьерных структур с поглощающим слоем InAsSb выступил к.ф.-м.н. В. С. Ковшов (ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»). Представлены результаты теоретических исследований спектральных и фотоэлектрических характеристик ИК МФПУ на основе барьерной nVn структуры с поглощающим слоем InAs_{0,91}Sb_{0,09} с длинноволновой границей чувствительности $\lambda_{0,5} \sim 4$ мкм. По задаче расширения спектрального диапазона до 5 мкм предложено техническое решение в виде nVn структуры на основе InAs_{0,81}Sb_{0,19}, обеспечивающей повышенные фотоэлектрические характеристики при рабочих температурах до 150 К.

С докладом о результатах разработок и исследований перспективных БИС считывания с аналого-цифровым преобразованием (АЦП) на кристалле выступил Н. А. Ларионов (ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»). Отмечено, что на данный момент существует три способа реализации АЦП на кристалле: а) в ячейки считывания; б) в столбце; в) на выходе. Первые два способа предпочтительнее, так как позволяют существенно уменьшить шумы аналоговых блоков, но сложнее в реализации. Третий способ хоть и не уменьшает внутренние шумы БИС, но исключает их во время передачи сигнала до блока обработки и исключает внешние усилители и АЦП.

В настоящее время в ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» реализованы матрицы линейного типа с АЦП в ячейке и цифровым ВЗН и в столбце с помощью $\Delta\Sigma$ -АЦП, а также прототип цифровых ячеек считывания для матричных фотоприемных устройств. В результате моделирования и эксперимента было установлено, что при увеличении тока в 16 раз

в случае классического автосброса значение цифрового кода вырастает в 12 раз, а в гибридной ячейке увеличение тока в 16 раз увеличивает значение цифрового кода в те же 16 раз, что говорит о высокой линейности.

Разработанные ячейки считывания лучше всего подходят для ФЧЭ, которые генерируют относительно высокие токи – десятки наноампер. Потенциальная область применения – малоформатные матрицы с большим шагом порядка 40 мкм, в которых требуется высокая помехозащищенность. Проведенные разработки и исследования подтверждают актуальность и преимущества внедрения АПЦ на кристалле, а имеющиеся наработки открывают путь к серийному производству таких устройств.

Об особенностях микроболометрических приемников традиционного и инвертированного типа, а также болометров антенного типа с резистивной связью применительно к регистрации постоянного и импульсного терагерцового (ТГц) излучения рассказал к.ф.-м.н. М. А. Демьяненко (ИФП СО РАН). Применение в болометрах традиционного типа дополнительного резонатора, расположенного между поглотителем, нанесенным на мембрану болометра, и кремниевым окном, снабженным просветляющим покрытием, значительно повышает коэффициент поглощения ТГц излучения и делает приемник селективным. Болометры инвертированного типа являются широкополосными и в ТГц области обладают коэффициентом поглощения излучения более 50 %. Болометры антенного типа с резистивной связью вследствие повышенной теплопроводности обладают пониженной чувствительностью к постоянному излучению, однако имеют высокую чувствительность к импульсному излучению и высокое быстродействие.

Сигнал микроболометра при воздействии на него импульсного терагерцового излучения слабо зависит от теплопроводности болометра, если длительность импульсов излучения меньше времени тепловой релаксации болометра. Это позволяет изготавливать высокочувствительные приемники импульсного излучения, работающие с кадровой частотой в несколько сотен герц. Исследованные приемники на длине волны 100 мкм обладают минимальной обнаружимой мощностью излучения

$1,4 \times 10^{-9}$ W и минимальной обнаружимой энергией импульса излучения $2,5 \times 10^{-11}$ J.

Еще один доклад по теме матричных микроболометрических приемников, касающийся отработки отечественной технологии формирования термочувствительных пленок на основе VO_x для обеспечения их серийного производства, представил к.т.н. А. А. Солодков (АО «ОКБ «Астрон»). Подчеркнуто, что в последние годы определилась потребность в продолжении таких работ в связи с необходимостью развития конструкций ММБП в части увеличения формата матричного массива (более 10^6 элементов) и уменьшения шага элементов в массиве (до 12–8 мкм). Важным ожидаемым результатом таких работ должно быть создание (или применение из существующего и доступного) оборудования и технологических режимов, позволяющих сформировать термочувствительные пленки на основе VO_x (ТЧП VO_x) с высокой однородностью параметров (в части поверхностного сопротивления и др.) на подложках больших размеров. Отработка технологии формирования ТЧП VO_x была выполнена на базе метода реактивного магнетронного распыления ванадиевой мишени. Работы технологического характера выполнялись с использованием как зарубежного, так и отечественного оборудования в АО «НТО» (С.-Петербург). Измерения параметров ТЧП VO_x выполнялись в АО «ОКБ «Астрон» и ООО «Маппер». Полученные результаты подтвердили, как возможность достижения требуемых значений функциональных параметров ТЧП VO_x , так и приемлемую стабильность воспроизводства свойств образцов в пределах площади пластин. Повторяемость параметров ТЧП VO_x в пределах партии пластин также может быть предварительно оценена как приемлемая.

Результаты исследований спектральных характеристик QWIP фотоприемников в своем докладе представил Р. В. Давлетшин (ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»). Были представлены результаты комплексного измерения спектральных характеристик МФПУ формата 384×288 с шагом фоточувствительных элементов 25 мкм и периодом дифракционной решетки 2,8 мкм на основе гетероэпитаксиальных структур AlGaAs/GaAs, выращенных в АО «НПО «Орион» на подложках GaAs.

В докладе к.ф.-м.н. Е. В. Куницыной (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) представлены первые отечественные неохлаждаемые быстродействующие InAs/InAsSbP фотоприемники мостиковой конструкции (air-bridge), работающие при комнатной температуре в диапазоне длин волн 1,1–3,8 мкм. Особенностью конструкции этих фотоприемников является формирование лицевого контакта в форме воздушного мостика, соединяющего фоточувствительную и опорную мезы. Ранее данный подход был предложен учеными ФТИ им. А. Ф. Иоффе для фотодиодов на основе GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb гетероструктур. Фотоприемники мостиковой конструкции были изготовлены на основе гетероструктур InAs/InAsSbP с помощью методов стандартной оптической литографии. Разработанные фотоприемники демонстрируют максимальную спектральную чувствительность в диапазоне 2,8–3,1 мкм. Величина темнового тока составляет 2–3 мкА при малых обратных смещениях $U < 0,02$ В, дифференциальное сопротивление в нуле смещения – $R_0 = 1,0–5,6$ кОм, емкость лучших приборов – $C = 3,4–3,6$ пФ при $U_{rev} = 0$ В. Измерения показали, что быстродействие фотоприемника составляет 200 пс. Созданные мостиковые InAs/InAsSbP фотоприемники могут использоваться для регистрации лазерных импульсов в диапазоне длин волн 1,5–3,8 мкм.

Представитель ФТИ им. А. Ф. Иоффе к.ф.-м.н. А. Н. Семенов выступил с обзором исследования солнечно-слепых фотодиодов Шоттки на основе AlGaIn, выращенных методом ПА-МПЭ. Были исследованы возможности оптимизации конструкции фотодиодов Шоттки на основе n -AlGaIn/AlN/ c -Al₂O₃ гетероструктур, выращенных методом плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии (ПА МПЭ) на подложках c -сапфира с различными буферными слоями, выращенными как методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений, так и ПА МПЭ, а также влияние типа буферных слоев и его структурного качества на характеристики токов утечки и спектральных чувствительностей фотодиодов Шоттки.

Результаты перспективных разработок эпитаксиального и планарного оборудования для материалов A₃B₅-переход от R&D к производственно-ориентированному уровню представил к.ф.-м.н. С. И. Петров (АО «НТО»).

Показан текущий уровень разработок и производства опытных образцов оборудования для выращивания широкого спектра приборных гетероструктур на основе нитридов, арсенидов и антимоноидов третьей группы, а также КРТ. Представлены результаты разработки производственно-ориентированного оборудования для плазмохимического травления и осаждения, а также электронно-лучевого и магнетронного напыления. В настоящее время АО «НТО» серийно выпускает установки МЛЭ для работы с подложками диаметром до 100 мм, а также ряд установок плазмохимии, физического осаждения и термического отжига для обработки подложек диаметром 100–200 мм, в которых используются собственные ключевые технические решения, в том числе целый ряд запатентованных ноу-хау. Технические характеристики выпускаемого оборудования находятся на уровне лучших мировых аналогов, а по части параметров превосходят их.

Секция «Системы тепловидения, системы наведения, приборы ночного видения»

Секция открылась докладом представителя АО «ПО «УОМЗ-филиал «Урал-Геофизика» Г. Д. Кривоклякина на тему «Насколько полно ИК-система реализует режим BLIP (Background Limited Photodetecting): простой и робастный метод измерения числа электронов в зарядовом пакете пикселя». Представлен простой в реализации, робастный (устойчивый к вариациям условий измерений и некоторых параметров, в отношении которых допустима неопределенность), новый метод измерения эффективной электрической емкости C_{eff} . Метод основан на углубленном анализе температурных зависимостей $V(T)$ отклика пикселя (пикселей) ИК матрицы на излучение предъявляемого черного тела (ЧТ), а именно – на вычленении конгруэнтных свойств кривых, представляющих такие зависимости. Достоинством метода является относительная независимость рассчитываемых значений C_{eff} от положения границ спектрального интервала чувствительности, формируемого полосовым фильтром (как правило, наличествующим в составе ОЭС); более того, метод позволяет уточнять положение границ рабочего спектрального интервала.

В докладе представителя АО «ПО «УОМЗ-филиал «Урал-Геофизика» Ю. Р. Винецкого «Всеракурсные индикатрисы силы излучения воздушного объекта: методика измерений и научная визуализация» была освещена специально разработанная методика натуральных экспериментов, описаны средства измерений, основой которых служили ИК-камеры метрологического класса фирмы FLIR (США), были изложены примененные способы автоматизированной обработки «сырых» видеоданных, позволившие осуществлять селекцию собственного теплового излучения объекта на фоне сцены в многокадровой последовательности, ассоциируя каждый из кадров с актуальными значениями ракурсных углов ВО – азимута и угла места. Представлены результаты разработки компактного, нетребовательного к операционной среде ПО интерактивной 3D-визуализации всеракурсных индикатрис и приводятся их примеры. Также обсуждены некоторые типовые особенности индикатрис, возможности их дальнейшего использования и углубленной интерпретации.

Анализ возможностей регистрации изображений в дальней инфракрасной области спектра в своем докладе представил М. В. Агринский (АО «ОКБ «Астрон»). Отмечено, что перспективным является создание композиционных оптических материалов для применения в спектральном диапазоне 8–26 мкм. Обычные связи С-С, С-Н, например, полиэтилена прозрачны в дальней ИК-области до 36 микрон. Одновалентный бромид меди прозрачен до 30 мкм, фторид бария прозрачен до 12 мкм, сера до 32 мкм, сульфид цинка – больше 25 мкм. Обратим внимание на поглощение связи С-Н у циклических алканов. Валентные колебания С-Н имеют поглощение в области 3,5 мкм, деформационные колебания С-Н в области 7,5 мкм, а колебание скелета около 10 мкм. Важной задачей, которую необходимо решить при создании такого приёмника, является выбор оптимальной рабочей температуры матрицы для снижения уровня шума. Температурная стабилизация матрицы может быть обеспечена, например, с применением термоэлектрических охладителей.

О проблеме получения высокочувствительных видеоизображений от научных камер до охранных систем в Специальной астрофизической обсерватории Российской академии

наук (САО РАН) сделал доклад сотрудник САО РАН И. В. Шалдырван. В докладе представлена разработка новой многофункциональной системы ночного и дневного видения, установленной возле оптических телескопов САО РАН. Камера изготовлена на базе ИР-фотоприемника с CMOS матрицей изображений. Современные ИР-камеры на основе CMOS имеют особенности в программном обеспечении (ПО) контроллера управления камеры, по причинам которых требуется применять различные методы обработки получаемых данными камерами изображений.

Модульную конструкцию прибора ночного видения (ПНВ) на основе матричного фотоприемного устройства (МФПУ) из коллоидных квантовых точек, его структурную схему, 3D модель и эскиз прибора представил А. С. Куролес (ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»). Отмечено, что спектр функциональных возможностей применения одного ПНВ можно расширить за счет реализации принципа модульности его конструкции, т. е. возможности быстрой трансформации прибора – смены объектива, окулярной системы, типа крепежного кронштейна пользователем в зависимости от его целей при работе с прибором. Представлен вариант конструкции прибора, который может использоваться как монокуляр или псевдобинокуляр ночного видения, в зависимости от выбранной пользователем насадки. В зависимости от типа насадки, в ней, помимо окулярной системы, расположены один или два LED дисплея, на которые выводится изображения с ФПУ.

В докладе д.ф.-м.н., профессора О. Е. Терещенко (Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН) приведены сведения об исследованиях и разработке концепции электронно-оптических преобразователей УФ-диапазона для астрофизических исследований на основе фотокатодов GaN и CsI, проводимой совместно с Институтом астрономии РАН. В рамках космического проекта «Спектр УФ» для Блока Камер Поля (БКП) ведутся работы по разработке отечественных солнечно-слепых ЭОП космического исполнения с фотокатодами GaN и CsI, с разрешением не менее 2000 эквивалентных пикселей, работающих в режиме счета фотонов. К настоящему времени исследованы фотоэмиссионные свойства изготовленных приборов.

В следующем докладе рассмотрены дефекты микроканальных пластин, влияющих на чистоту поля зрения ЭОП III поколения. Отмечено, что основными видами дефектов являются: дефекты формы, посторонние частицы (ПЧ) и налёты, отслоение контактных электродов на основе Sr. Дефекты формы МКП, как правило, производственные и (или) связаны с технологией производства. Также большой проблемой является искажение геометрии каналов по границам спекания многослойных световодов (МЖС).

Еще один представитель АО «НПО Геофизика-НВ» Л. М. Балясный свой доклад посвятил результатам создания двухспектрального оптико-электронного устройства для обнаружения пятна лазерного дальномера (ЛЦД) на удаленном объекте. Было отмечено, что одной из актуальных задач при проведении испытаний и эксплуатации лазерных целеуказателей и дальномеров, работающих в инфракрасном диапазоне спектра (1,06 и 1,54 мкм), является визуализация пятна лазерного излучения при дальнометрировании объекта наблюдения в широком диапазоне освещенности.

Доклад о создании квазипористых структур на основе минимальных поверхностей для микроканальных теплообменных аппаратов и поверхностей, рассеивающих теплоту, сделал А. И. Миронов (ФГБОУ ВО МГТУ им. Баумана). В докладе были представлены некоторые образцы теплообменных поверхностей нового типа на базе трижды периодических минимальных поверхностей (ТМП/TPMS), а также результаты измерений геометрических размеров при 3D печати алюминиевым порошком. Измерения выполнялись для сравнения качества и определения отклонений, спроектированных и созданных методом 3D печати структур.

Секция «Системы и методы измерений»

О методике измерения теплофизических параметров криостатов охлаждаемых ФПУ рассказал к.т.н. К. В. Чиж (АО «Московский завод «Сапфир»). Приведены результаты исследований по разработке методики измерения теплофизических параметров криостатов охлаждаемых фотоприемных устройств. К таким параметрам относятся теплоприток к

криостату, приведенная охлаждаемая масса криостата и температура криостатирования. Они являются определяющими при разработке конструкции криостата и выборе охлаждающего устройства, которое будет работать с ним в составе ФПУ. В основу разработанной методики были положены способы измерения теплопритоков и охлаждаемой массы криостата с помощью электрического расходомера. Проведенные исследования показали, что истинные характеристики термодатчиков отличаются от линейной зависимости. На уровне температур 80–90 К расхождения реальных показаний термодатчиков (ТД) и градуировочных значений составляют 1,5–2 К. Кроме того, при измерениях температур ниже 77 К, эти расхождения еще больше увеличиваются. В результате исследования предложена формула для градуировки ТД, учитывающая нелинейность их характеристик в диапазоне температур от 77 К до 60 К.

Результаты исследований теплофизических характеристик инфракрасных многорядных фотоприёмных устройств с цифровыми (ФПУ-Д) и аналоговыми (ФПУ-А) фотомодулями в своем докладе представил В. И. Бурлаков В.И. (ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»). Исследования позволили выявить особенности технических решений и конструкций при использовании этих ФПУ, а также преимущества применения цифровых фотомодулей с дельта-сигма аналого-цифровым преобразованием от БИС считывания.

Л. В. Скрипачева (АО «ОКБ «Астрон») представила материалы, касающиеся измерения функции передачи модуляции (ФПМ) инфракрасных объективов с использованием микроболометрических матричных детекторов. Рассмотрен метод измерения ФПМ, основанный на анализе профиля сигнала в ИК изображении целевой мишени. Представленный метод измерения ФПМ, основанный на анализе профиля сигнала в ИК изображении целевой мишени, дает возможность проводить экспериментальное экспресс-тестирование ИК объективов после их сборки. Полученные данные могут использоваться для прогнозирования предельных характеристик по обнаружению, распознаванию и идентификации тепловых объектов оптико-электронными приборами, использующими изготавливаемые ИК-объективы.

Методический подход к оценке термоупругих свойств микроболометрических приемников мембранного типа на этапе проектирования раскрыл в своем докладе к.т.н. А. А. Солодков (АО «ОКБ «Астрон»). Для оценки термоупругих свойств конструкций мембранного типа предложено использовать пакеты компьютерного моделирования COMSOL Multiphysics и ANSYS, реализующие расчетные процедуры на базе метода конечных элементов. Исходные образцы конструкций формируются в САПР AutoCad или SolidWorks.

Результаты исследований фотоэлектрических характеристик фотоприемников среднего ИК-диапазона на основе ККТ представил Яковлев В.О. (Московский физико-технический институт). Была разработана специализированная установка для исследования фотоэлектрических параметров, позволяющая проводить экспресс-тесты фотодетекторов и получать абсолютные значения фоточувствительности, быстродействия. Конструкция установки позволяет удобно модифицировать её путем замены модулей, что повышает удобство использования и универсальность установки. С использованием разработанной установки проведены тестовые измерения фотоэлектрических характеристик фоторезисторов на основе ККТ.

Результаты определения терморadiационных характеристик на рефлектометрах «РС-К» и «РИ-К» материалов космических аппаратов (КА) в своем докладе представил А. М. Шамаев (АО «Композит»).

В докладе А. В. Мингалева (АО «НПО ГИПО») приведено описание стенда измерения параметров многоэлементных фотоприемных устройств (МФПУ), который позволяет полностью в автоматическом режиме выполнять измерение фотоэлектрических параметров многоэлементных приемников излучения, работающих с регистрацией излучения в диапазонах длин волн 3–5 и 8–12 мкм, при разработке и серийном производстве образцов тепловизионной техники.

Секция «Технология изготовления фотоприемных устройств»

Секция открылась докладом Д. А. Коловского (ИТ СО РАН им. С. С. Кутателадзе)

о технологии напыления сверхтонких пленок золота методом импульсной лазерной абляции (ИЛА) на подложки кремния и кварца. Предлагается использовать этот метод для напыления сверхтонких пленок золота. Напыление пленок осуществлялось при давлении 10 Па в вакуумной камере в атмосфере кислорода с помощью твердотельного импульсного Nd:YAG лазера с длиной волны 532 нм. Анализ морфологии поверхности пленок проводился методами атомно-силовой микроскопии (Bruker Multimode 8) и сканирующей электронной микроскопии (JEOL JSM 6700F). Показано, что методом ИЛА можно напылять проводящие сверхтонкие пленки золота толщиной менее 5 нм на подложки кремния и кварца без использования адгезионных слоев и/или охлаждения подложки до криогенных температур.

О локальных измерениях слабых напряжений на поверхности структур (013) HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs с помощью генерации второй гармоники сделал доклад к.ф.-м.н. С. А. Дворецкий (ИФП СО РАН). Представлены экспериментальные результаты регистрации «запрещенного» сигнала генерации второй гармоники (ГВГ) в нелинейном кристалле при отражении зондирующего ИК-излучения от приповерхностного широкозонного вариозонного слоя HgCdTe гетероструктуры при вращении образца. Результаты свидетельствуют о том, что практически весь сигнал ГВГ в максимумах развертки ФЭУ соответствует слабой анизотропии кристаллической структуры исследуемого приповерхностного слоя образца, связанной с его слабой деформацией.

Еще один представитель ИФП СО РАН И. А. Краснова представила результаты изучения электрофизических характеристик границы раздела HfO₂/HgCdTe с различной обработкой поверхности методом PE-ALD. Исследования проводились на ГЭС МЛЭ Hg_{0,78}Cd_{0,22}Te *n*-типа с концентрацией электронов, определяемой бесконтактным методом Холла, около $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Установлено, что применение обработок с последующим осаждением оксида гафния приводит к увеличению концентрации донорных центров в области пространственного заряда КРТ. Применение методики обработки поверхности КРТ перед нанесением диэлектрического покрытия

является перспективным направлением исследований по пассивации поверхности КРТ, результаты которых могут быть применены в существующей технологии изготовления фотоприемных устройств.

Н. А. Иродов (ГНЦ РФ АО «НПО «Орион») представил результаты исследований процессов гибридной кристаллизации БИС считывания и МФЧЭ матричных фотоприемных устройств ИК-диапазона, которые проводились на установках с автоколлиматором и без автоколлиматора методом перевернутого кристалла и определена необходимость использования автоколлиматора для различных фотоприемников: крупноформатных, малогабаритных и многорядных.

Еще один представитель ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» к.т.н. Е. В. Мирофянченко сообщила о результатах исследований процессов фотолитографии для изготовления матричных фоточувствительных структур из ККТ на основе сульфида свинца. Разработан способ, позволяющий проводить процессы фотолитографии по фоточувствительным слоям ККТ. Выполнена настройка режимов технологических операций, ранее не применяемых при создании фоточувствительных элементов на основе ККТ PbS в РФ. Изготовлено более 10 образцов, включая формирование слоёв металлизации и фоточувствительных слоев, проведение процессов фотолитографии и травление. На основе результатов по имеющейся выборке образцов было подтверждено отсутствие негативного влияния процессов фотолитографии на их электрофизические характеристики.

Использование структурного массива фотодиодов с изменяемой площадью для определения качества пассивации в МФПУ на основе InSb предложил С. Е. Шишигин (ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»). Предлагается использовать тестовые структуры МФЧЭ с изменяемой топологией, изготовленные на периферии рабочих пластин и гибридизированные с существующими БИС считывания формата 640×512 с шагом 15 мкм, с целью получения зависимостей темного тока от отношения периметра к площади массива фотодиодов с изменяемой площадью, используя в качестве измерителя темного тока БИС считывания. Предложенные матричные структуры с изменяемой площадью p - n -переходов позволяют

определить источники темнового тока и существенно ускорить разработку новых пассивирующих покрытий в МФПУ на основе InSb.

Про моделирование, исследование и оптимизацию параметров микрокриогенных систем Стирлинга рассказал Г. И. Некрасов (ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»). В докладе изложены результаты оптимизации конструктивных параметров МКС с целью улучшения выходных характеристик МКС, повышения надёжности и технологичности.

В развитие этой темы М. В. Банников (ГНЦ РФ АО «НПО «Орион») рассказал о технологических решениях для серийного производства газовых микрокриогенных машин Стирлинга.

Секция «Материалы фотосенсорики и методы их получения»

В. А. Улькаров (ГНЦ РФ АО «НПО «Орион») представил результаты разработки базовой технологии полирования пластин InSb для эпитаксиального роста фоточувствительных материалов методом МЛЭ. Исследована возможность получения из отечественного InSb, выращенного методом Чохральского, пластин-подложек, удовлетворяющих требованиям МЛЭ для проведения эпитаксиальных процессов. Из анализа полученных в ходе исследований данных следует, что эпитаксиальные слои InAsSb, выращенные методом МЛЭ на подложке из InSb, выращенного методом Чохральского в АО «Гиредмет», и подготовленной к эпитаксиальным процессам в рамках совместных работ с АО «НПО «Орион» и ФИАН, по качеству практически не уступают полированным подложкам компании Ram-Xiamen (Китай).

А. А. Трофимов (ГНЦ РФ АО «НПО «Орион») рассказал о результатах работ по улучшению технологии подготовки подложек CdZnTe диаметром 50,8 мм для эпитаксиального выращивания твердых растворов A_2B_6 методом МЛЭ. Подложки CdZnTe изготовлены из слитков, выращенных методом Бриджмена в АО «Гиредмет».

Результаты разработки промышленно-ориентированной технологии изготовления полированных пластин InSb диаметром до 100 мм представила Е. Н. Абрамова

(АО «Гиредмет» им. Н. П. Сажина). В частности, рассмотрены особенности роста монокристаллов антимонида индия и получения полированных пластин на их основе.

Обзорный доклад о некоторых тенденциях развития технологий выращивания объемных кристаллов фотоники сделал А. В. Наумов (АО «ОКБ «Астрон»). Проанализированы стабильность и нелинейная динамика роста кристалла методом «вертикального Бриджмена» без контакта растущего кристалла со стенками тигля. Отмечено, что выращивание методом Бриджмена без контакта кристалла со стенками оснастки открывает возможность получения принципиально новых качеств кристалла.

Результаты проводимого исследования 100 мм пластин Ge, предназначенных для эпитаксиальных процессов, представил В. А. Малыгин (ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»). Применение результатов исследований и корректирование технологического процесса изготовления германиевых пластин привело к увеличению эффективности фотообразования трехкаскадных солнечных элементов GaInP/GaAs/Ge, получаемых на отечественных пластинах Ge производства АО «Германий». Наблюдается стабилизация всех основных электрических параметров солнечных элементов: плотности тока короткого замыкания, напряжения холостого хода. Достигнутое значение КПД (29 %) соответствует мировому уровню.

Представитель Физического института им. П. Н. Лебедева РАН С. Н. Николаев сделал доклад об исследовании спектроскопии сульфидов олова и европия, синтезированных при высоком давлении, отметив, что в физике полупроводников заметное место занимает раздел, связанный со слоистыми материалами.

Результаты исследований влияния постростового отжига на дислокационную структуру кристаллов германия представил А. П. Григорович (АО «Германий»). В докладе отмечено, что основным типом дефектов, оказывающих значительное влияние на структурное совершенство и свойства кристаллов германия, являются дислокации. Высокая плотность дислокаций затрудняет применение кристаллов в оптике, детекторах ионизирующих излучений и исключает возможность их использования в фотовольтаике в качестве

подложек для эпитаксиальных структур типа GaInP/GaInAs/Ge, являющихся основой фотопреобразователей с высоким КПД. Наличие дислокаций вызывает несоответствие параметров кристаллических решеток Ge и соединений A_3B_5 , препятствуя росту высококачественных эпитаксиальных слоев на германиевой подложке.

В докладе сотрудника Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» К. С. Гришакова было представлено моделирование и оптимизация электрооптического эффекта в модуляторе Маха Цендера на технологической платформе InP. В докладе представлены расчеты спектров поглощения и изменений показателя преломления при наличии постоянного электрического поля для структур с туннельно-связанными КЯ на основе InGaAlAs.

Д. Ю. Годовский (Институт элементоорганических соединений им. Несмеянова РАН) представил результаты исследований высокоэффективных тройных полимерных солнечных фотоэлементов на основе двух нефуллереновых акцепторов с комплементарными спектрами поглощения от ближней до средней ИК-области.

Представитель Сербии Теодора Миленкович (Московский физико-технический институт) сообщила о результатах экспериментов по исследованию свойств морфологии тонких пленок, созданных на основе ККТ халькогенидов ртути, в зависимости от вариации параметров нанесения. Эксперименты проводились в двух разных средах – на воздухе и в инертной аргоновой среде. Атомно-силовая микроскопия в полуконтактном режиме была использована для изучения морфологии поверхности и определения толщины полученных пленок в зависимости от различных замен лигандов (этандитиол-1,2, роданид, сульфид и иодид). Для сравнения с образцами, полученными методом layer-by-layer deposition с заменой лигандов в пленках, были созданы образцы на основании «чернил», т. е. с проведенной заменой лигандов в коллоидном растворе. С помощью кельвин-зондовой микроскопии были изучены электрические свойства пленок, полученных на основе «чернил».

В заключение работы секции интересный доклад представил А. Б. Тарасов (Лаборатория

новых материалов для солнечной энергетики, факультет Наук о материалах МГУ имени М. В. Ломоносова) с обзором истории становления и потенциале применения в качестве фотодетекторов ближнего ИК-диапазона перовскитных солнечных элементов. Автором представлены результаты разработки простой и универсальной масштабируемой стратегии инкапсуляции перовскитных солнечных элементов, основанной на термовакуумном испарении защитного слоя MgF_2 или MoO_3 -х с последующей герметизацией устройства стеклом и полимером, отверждаемым УФ-излучением.

Заключение

Фотоэлектроника – это стремительно развивающееся направление современной физики и техники, относящееся к важнейшим наукоемким технологиям Российской Федерации. Инфракрасная оптоэлектроника и фотоника признаны в мире критическими технологиями, определяющими уровень научного и технологического развития страны. В сложившейся геополитической обстановке для достижения необходимого уровня национальной безопасности и обороны страны значительно возросла роль инфракрасной фото- и оптоэлектроники, обеспечивающей возможности и тактико-технические характеристики практически всех видов ВВСТ. Фото- и оптоэлектроника также широко используется в науке, промышленности, космической и других отраслях.

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. Уменьшение шага и повышение формата является всеобщим трендом практически для всех мировых разработчиков и производителей матричных фотоприемных устройств. Вместе с тем, участниками конференции отмечены ключевые моменты развития и применения новых материалов и структур, в первую очередь, на основе коллоидных квантовых точек, возникновение новых техно-

гий и конструкций, создание новых фотоприемников и источников ИК-излучения, расширение номенклатуры решаемых задач.

По мнению участников конференции, основными тенденциями развития технологий инфракрасной фотосенсорики и фотоники являются:

- разработка одно- и многоспектральных охлаждаемых матричных фотоприемных устройств (МФПУ), в том числе третьего поколения мегапиксельных форматов, повышающих вероятность обнаружения и распознавания объектов и другие тактико-технические характеристики систем;

- совершенствование фоточувствительных гетероэпитаксиальных полупроводниковых структур различной архитектуры с разными функциональными слоями (xVn , T2SL и др.), позволяющих создавать МФПУ с повышенными основными фотоэлектрическими и эксплуатационными характеристиками, в том числе с повышенной относительно «азотной» рабочей температурой охлаждения, обеспечивающей снижение весо-габаритных параметров и потребляемой мощности;

- развитие твердотельной фотоэлектроники коротковолнового ИК-диапазона для области спектра 1–3 мкм как на основе традиционных структур с активными слоями InGaAs и КРТ, так и с активными слоями из коллоидных квантовых точек;

- продолжение исследований и разработка сверхпротяженных фотоприемных устройств на основе стыкуемых ВЗН-модулей с количеством каналов более 10 тысяч и числом стадий ВЗН накопления 8–10 и крупноформатных матриц (до $6k \times 6k$ элементов) коротковолнового, средне- и длинноволнового ИК-диапазонов для космических применений;

- исследование архитектур, методов получения и основных свойств фотонных сенсоров на основе структур ограниченной размерности из соединений элементов II, IV и VI групп Периодической таблицы Д. И. Менделеева;

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

- исследование и разработка новых методов регистрации слабых оптических сигналов, в том числе на новых физических принципах;

- разработка ФПУ с высокой плотностью пикселей, низкими темновыми токами и вы-

сокой фоточувствительностью (квантовой эффективности $\geq 50\%$), для чего необходимо решить 3 основные задачи, а именно: разработать технологию роста качественных МЛЭ структур с толщиной активной области 5 мкм и более; разработать технологию плазмохимического (или комбинированного) травления меза-структур с близкими к вертикальным стенками; разработать технологию пассивации стенок меза-структура с целью уменьшения темновых токов утечки;

– создание современных отечественных фотоприемников, освещаемых с обратной стороны подложки за счет применения технологии бондинга приборной пластины и технологии КМОП фотоприемников;

– создание многоэлементных и матричных ФПУ на основе вакуумных или газонаполненных криостатов и газовых криогенных машин, предназначенных для тепловизионной аппаратуры различного назначения, а также исследование технологических возможностей создания систем криостатирования для аппаратуры космического базирования с использованием одной или нескольких ГКМ разнесенного или моноблочного типа, а также ГКМ с пульсационной трубой;

– разработка и изготовление инфракрасных матричных фотоприемных устройств в SWaP-концепции с повышенными рабочими характеристиками;

– дальнейшее развитие изделий фотоники, обусловленное созданием многослойных гетероструктур группы материалов A_3B_5 на основе квантово-размерных структур и короткопериодных сверхрешеток;

– разработка и совершенствование процессов выращивания фоточувствительных структур на «альтернативных подложках» большого диаметра;

– дальнейшие исследования перспективных материалов для ИК-фотоприемников на основе множественных $Cd_xHg_{1-x}Te$ квантовых ям;

– достижение расширения спектральной чувствительности фотоприемных элементов приборов ночного видения в коротковолновую инфракрасную область, характеризующуюся максимальным излучением ночного неба, за счет создания вакуумных фотокатодов с использованием новых принципов (например, гетероструктуры с барьером Шоттки, наноструктуры с квантовыми ямами и др.), а также

применения твердотельных матричных фотоприемных устройств;

– освоение и развитие новейших поколений техники ночного видения с высоким пространственным разрешением на основе улучшения технического уровня, качества и надежности микроканальных пластин;

– применение эффекта поляризации излучения как новый подход к расширению возможности тепловизионных приемников;

– развитие и совершенствование технологии и конструкций матричных микроболометрических приемников в части увеличения формата матричного массива (более 10^6 элементов) и уменьшения шага элементов в массиве (до 12–8 мкм), а также разработки низкотемпературных методов получения тонких слоев диэлектриков с заданными механическими напряжениями для производства этих микроболометров;

– исследование процессов гибридизации кристаллов БИС считывания и МФЧЭ матричных фотоприемных устройств ИК-диапазона;

– совершенствование технологии подготовки и освоения производства подложек $CdZnTe$ диаметром два дюйма, предназначенных для эпитаксиального выращивания $HgCdTe$ методом МЛЭ;

– дальнейшая разработка промышленно-ориентированной технологии изготовления полированных пластин $InSb$ диаметром до 100 мм;

– развитие и использование фотодетекторов на основе короткопериодных сверхрешеток второго типа в среднем ИК-диапазоне, как альтернатива для систем кадмий-ртуть-теллур ($HgCdTe$) и фотодетекторов на полупроводниковых квантовых ямах (QWIP);

– исследование и перспективы применения в качестве фотодетекторов ближнего ИК-диапазона перовскитных солнечных элементов, как новое направление в фотонике;

– дальнейшее развитие и совершенствование метрологического обеспечения фотоэлектрических параметров многоэлементных фотоприемных устройств, работающих в диапазонах длин волн 3–5 и 8–12 мкм;

– исследование и разработка методик реставрации (восстановления) фотоприемных модулей и приборов, входящих в состав оптоэлектронных систем для оперативного восстановления их работоспособного состояния.

Подводя итог, участники высоко оценили работу конференции, 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» XXVII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения продолжила традицию форумов, не одно десятилетие являющихся эф-

фективной площадкой для обсуждения новых идей и представления достигнутых результатов.

Результаты и материалы конференции легли в основу работы Секции № 12 «Технологии оптоэлектроники и фотоники», которая проводилась в рамках Российского Форума «Микроэлектроника 2024» 23–28 сентября 2024 года (г. Сочи).

ЛИТЕРАТУРА

1. Программа XXVII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М.: ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», 2024.
2. Тезисы докладов XXVII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М.: ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», 2024.
3. Презентации докладов XXVII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения.

PACS: 85.60-q

The main trends and directions of modern development of photoelectronics

(Review of the proceedings of the XXVII International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices)

I. D. Burlakov^{1,2}, V. V. Startsev¹ and A. Y. Yakovlev¹

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

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

Received 1.10.2024

On May 29–31, 2024, the XXVII International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices was held at the State Scientific Center of the Russian Federation, NPO Orion Joint Stock Company.

Keywords: photo and optoelectronics, infrared photosensory, photodetector, IR technology, photodetector, night vision device, colloidal quantum dots.

REFERENCES

1. The program of the XXVII International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices. (Orion R&P Association, JSC, Moscow, 2024).
2. Abstracts of the XXVII International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night vision devices. (Orion R&P Association, JSC, Moscow, 2024).
3. Presentations of reports of the XXVII International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices.