

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОЭЛЕКТРОНИКЕ И ПРИБОРАМ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ. Ч. 1

А. Дирочка, А. Филачев, ФГУП «НПО «Орион», Москва

Обзор современного состояния и перспектив развития фотоэлектроники в мире сделан по материалам докладов 21-й Международной конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, которая состоялась в ФГУП «НПО «Орион» (Москва) в мае 2010 года. В нем учтены тенденции развития научно-промышленной сферы – современные технологии, материалы, оборудование и достижения ведущих отечественных и зарубежных разработчиков.

Конференция охватила традиционные и новые направления в фотоэлектронике и приборах ночного видения. На заседаниях рассматривали фотонные и тепловые приемники излучения, формирователи сигналов изображения, системы термостатирования, нанотехнологии и применение метаматериалов в оптике. 225 докладов из 14 стран было представлено для участия в конференции. Выделяя некоторые крупные направления в работе конференции, анализируем их.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФОТОЭЛЕКТРОНИКИ

Доклады этого направления содержат информацию о разработке и производстве изделий современной фотоэлектроники ведущими разработчиками, о ближайшей перспективе и направлениях развития фотоэлектроники в целом. В постановочном докладе В. Пономаренко и А. Филачева («НПО «Орион») «Современное состояние и новые направления полупроводниковой ИК-фотоэлектроники» изложено текущее состояние и направления развития приборов и материалов фотоэлектроники во всем оптическом диапазоне спектра.

Рассмотрено состояние и последние достижения базовых технологий инфракрасной фо-

тоэлектроники: фоточувствительные материалы, твердотельные фотопреобразователи электромагнитного излучения, многоспектральные и быстродействующие приборы, устройства регистрации ТГц-излучения, метаматериалы и нанотехнологии для создания новых классов оптико-электронной аппаратуры. Проанализировано современное состояние полупроводникового материаловедения для фотоэлектроники. Рассмотрены перспективы развития молекулярно-лучевой и МОС-гидридной технологий изготовления важнейших фоточувствительных материалов – CdHgTe, InSb, InGaAs, GaAlN, GaAsP, GaInN и др.

Обсуждены основные тенденции развития твердотельных фотопреобразователей на основе твердых растворов $In_xGa_{1-x}As$ и $Cd_xHg_{1-x}Te$ для области спектра ночного свечения атмосферы (1–2 мкм) и результаты исследований матричных фотоприемных устройств на основе $In_{0,53}Ga_{0,47}As/InP$. Представлены результаты создания “смотрящих” и ВЗН-матриц (отвечающих задачам обнаружения слабых источников излучения, работающих в режиме временной задержки и накопления (ВЗН) больших форматов) из $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ и InSb для областей спектра 8–12 и 3–5 мкм с числом элементов 2×96, 2×256, 4×288,

6×576, 256×256, 384×288, систем цифровой обработки изображений, а также матричных формирователей тепловизионного видеосигнала на их основе.

Рассмотрены перспективы создания быстродействующих фотоприемных устройств, в том числе для получения 3D-изображений в тепловизионных и активно-импульсных оптико-электронных системах и результаты разработок р-и-n и лавинных фотодиодов из Si, InGaAs/InP и CdHgTe. Показаны последние результаты создания многоспектральных фотоприемных устройств (ФПУ) для областей спектра 1–3, 3–5 и 8–12 мкм, в том числе гибридных двухспектральных ФПУ формата 2×256 из PbS и PbSe с мультиплексированием фотосигналов в охлаждаемой зоне, монолитных двухспектральных матричных ФПУ формата 2×2×288 из CdHgTe, а также двухспектральной тепловизионной камеры на основе “смотрящих” матриц формата 256×256 из CdHgTe и InSb. Обсуждены перспективы создания фотоэлектронных модулей со “сверхдлинной” и кольцевой конфигурацией для задач космического мониторинга.

Проанализированы параметры УФ-фотоприемников на основе GaP, GaAs, GaP_xAs_{1-x} для диапазонов 0,2–0,51; 0,25–0,90; 0,25–0,68 мкм. Обсуждены перспективы создания фотоприемников для регистрации терагерцевого оптического излу-

чения в диапазоне длин волн 30–3000 мкм (ТГц-фотоэлектроника).

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

Доклад Comrain V. (Sofradir) посвящен новым разработкам ИК-фотоприемников во Франции. Рассмотрены, прежде всего, крупноформатные матрицы для “смотрящих” оптико-электронных систем. Показано, что более высокими параметрами обладают структуры р-типа на n КРТ (квантово-размерные точки). Выделено два направления в разработке фотоматриц 3-го и 4-го поколений: крупноформатные (с числом элементов 10^6

и более) с высокой чувствительностью и разрешением, при минимальном размере пикселей; и двухполосные, типа средневолновый ИК/средневолновый ИК, средневолновый ИК/длинноволновый ИК с размерами пикселя 20 мкм и менее.

В докладах О.Алымова и Р.Степанова («ЦНИИ «Электрон»); Д.Гиндина, В.Ежова и В.Карпова («МЗ «Сапфир»); А.Степанушкина и В.Годованюка («ЦКБ «Ритм», Украина); К.Болтаря, В.Пономаренко, В.Солякова, А.Филачева («НПО «Орион») в основном приведена номенклатура и параметры выпускаемых и разрабатываемых на этих предприятиях фотоэлектронных приборов. В докладе «ЦНИИ «Электрон» рассмотрено современное состояние разработок телевизионных фотоэлектронных приборов. Созданы приборы, чувствительные в ИК, видимой и УФ областях спектра. Приведены основные параметры широкоспектральных монолитных ИК

фоточувствительных приборов на барьерах Шоттки с числом элементов 512×512 из силицида платины для диапазона 1,2–5,5 мкм и из силицида иридия для диапазона 1,2–10,5 мкм с числом элементов 256×256 . Разработаны и выпускаются радиационно стойкие видиконы и фотоэлектронные умножители. ФЭУ-188 обладает высокой радиационной стойкостью и магнитоустойчивостью в полях до 4 Т.

Благодаря унификации базовой планарной технологии изготовления фотодиодов на основе InSb с применением локальной имплантации ионов бериллия «МЗ «Сапфир» провел модернизацию всех ранее разработанных серийных изделий путём замены фоточувствительных элементов (ФЧЭ) с глубоким залеганием р-п-перехода на планарные ФЧЭ. Разработана технология изготовления матричных ФЧЭ из InSb с использованием базовых планарных технологических процессов.

В «НПО «Орион» к настоящему времени разработаны и

выпускаются матричные фотоприемные устройства второго поколения на спектральные диапазоны 8–12 мкм (фоточувствительный материал КРТ) и 3–5 мкм (фоточувствительный материал InSb). Форматы фотоприемных устройств "смотрящего" типа 256×256 элементов для двух спектральных диапазонов. Разработано матричное ФПУ (МФПУ) формата 384×288 элементов на основе КРТ, прорабатывается вариант формата 320×256 на основе InSb. Разработаны многорядные фотоприемные устройства форматов 2×96, 2×256 и 4×288 элементов для использования в сканирующих тепловизионных приборах с режимом ВЗН. Достигнутые значения фотоэлектрических параметров МФПУ близки к теоретическому пределу, определяемому флуктуациями фонового излучения. Конструктивно все МФПУ выполнены в унифицированных вакуумных криостатируемых корпусах с применением интегральной микрокриогенной системы охлаждения.

Докладчик A.Rogalski из Польши сделал фундаментальный обзор по ИК-фотоприёмникам: фотонным, тепловым и термомеханическим. Были представлены последние успехи в мировой практике по этим направлениям.

КРТ 50 ЛЕТ. ЭТАПЫ ПУТИ

Узкозонные полупроводниковые твердые растворы теллурида кадмия и ртути занимают лидирующее место в производстве ИК-фотоприемников (ФП). В 2009 году исполнилось 50 лет со дня синтеза КРТ [1, 2] – тройного твердого раствора теллуридов кадмия и ртути. Этот важнейший полупроводниковый материал играет большую роль в развитии современной ИК-техники. В 2010 году исполнилось 50 лет с начала первых исследований КРТ в Советском Союзе и более 40 лет с начала работ по КРТ и приборам на его основе в НИИ прикладной физики («НПО «Орион»).

В СССР работы по разработке промышленной технологии для производства твердых раство-

ров КРТ были начаты в 1972 году на Светловодском заводе чистых металлов Министерства цветной металлургии СССР. На заводе был использован весь опыт организаций, занимавшихся получением кристаллических материалов $Hg_{0,8}Cd_{0,2}Te$, пригодных для изготовления малоэлементных фоторезисторов для области длин волн 8–14 мкм. Это, прежде всего НИИ прикладной физики («НПО Орион»), ГИПО (Казань), ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Ленинград), МИСиС, Львовский госуниверситет, Черновицкий госуниверситет и др. При этом на заводе были испытаны все известные к тому времени методы получения (Бриджмена в различных вариациях, зонной плавки – методы Дзюба и Уеда, твердотельной рекристаллизации – также во всех известных вариациях) и обработки кристаллов.

Были заслушаны доклады «50 лет развития твердых растворов теллуридов кадмия и ртути в СССР и России» – В.Стафеев, В.Пономаренко, И.Бурлаков, К.Болтарь, А.Филачев («НПО «Орион»); «Организация промышленного производства монокристаллических пластин $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x = 0,2; 0,3$ и $0,5$) в СССР» – К.Курбанов, Ю.Гаврилюк (Кременчуг, Украина); «Что дало изучение $HgCdTe$ для понимания явлений переноса в полупроводниках» – Н.Берченко, А.Елизаров (Львов, Украина).

Рассмотрены основные результаты и этапы создания технологии КРТ (монокристаллов и эпитаксиальных слоев) и разработки фотоприемных приборов на его основе. Показано, что на начальном этапе 1960–1970 годов разработаны физико-технологические основы выращивания КРТ и проведены его исследования, изготовлены первые образцы фотоприемников. Создание технологии и организации производства монокристаллов и эпитаксиальных слоев КРТ, разработка ФПУ на основе фоторезисторов, в том числе многоэлементных, и фотодиодов (ФД) характеризовали период 1970–1990 годов. За 1990 – 2000 годы произошло постепенное смещение приоритета в на-

правление разработки эпитаксиальных структур КРТ большой площади и ФПУ на основе крупноформатных матриц КРТ ФД, интегрированных с микросхеменной схемой обработки сигнала непосредственно в холодной зоне. В первом десятилетии 21 века в «НПО «Орион» и другие ведущие мировые производители на основе КРТ разработали матричные фотоприемные устройства второго поколения как многорядного, так и «смотрящего» типов, активное внедрение которых в новое поколение тепловизионной и тепловизионной техники происходит в настоящее время.

КРТ – МАТЕРИАЛ, ТЕХНОЛОГИЯ, ПРИБОРЫ

Для мегапиксельных ИК ФП требуются пластины КРТ большой площади с заданной высокой латеральной однородностью состава. Материаловедческая часть получения и исследования пленок КРТ представлена в цикле работ ИФП СО РАН, НИИ материалов «Карат» (Львов, Украина), «ГИРЕДМЕТ», SOFRADIR, Томского госуниверситета, «Альфа», университета Западной Австралии и некоторых других.

Этой проблеме в частности посвящён доклад М.Якушева и его группы (ИФП СО РАН) «Гетероструктуры $HgCdTe$, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) для мегапиксельных инфракрасных фотоприемников». Технология МЛЭ имеет несомненные преимущества перед другими методами, являясь наиболее разработанным, гибким методом получения такого материала в виде гетероэпитаксиальных структур (ГЭС). Встроенная эллипсометрическая аппаратура позволяет с высокой точностью проводить контроль состава эпитаксиальной пленки КРТ и его изменения в процессе роста. Это открывает широкие возможности для оптимизации дизайна гетероструктуры, позволяющего упростить технологию изготовления ИК ФП с предельными параметрами. С помощью новых методов контроля разрабатывают многоспектральные

ИК ФП, лавинные и ФП, работающие при повышенных и комнатных температурах. Одним из преимуществ метода МЛЭ при выращивании КРТ является использование дешевых кремниевых пластин. Для охлаждаемых гибридных крупноформатных ИК ФП существенна проблема надежности при термоциклировании от комнатной температуры до температуры жидкого азота. Данная проблема упрощается именно при использовании кремниевых подложек для выращивания КРТ.

Оптимизация процессов преэпитаксиальной подготовки поверхности кремниевой подложки, условий формирования гетероперехода подложка – буферный слой ZnTe и процессов роста КРТ позволяет получать ГЭС КРТ МЛЭ без антифазных границ с однородным распределением по поверхности морфологических V-дефектов и ямок травления с плотностью менее 1000 см^2 и 10^7 см^2 , соответственно. Проведено выращивание ГЭС КРТ МЛЭ на подложках из кремния диаметром до 102,4 мм. Максимальное отклонение состава на диаметре 76,2 мм составляет менее 0,002 мол.дол./см ($\Delta\lambda_{1/2}=0,1 \text{ мкм}$ при 77 К) для ГЭС КРТ МЛЭ с составами $X_{\text{CdTe}} \sim 0,3$ мол. дол.

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

НОВЫЕ ИДЕИ, ЗАМЫСЛЫ, ПРИБОРЫ

Большой интерес вызвали доклады В.Рыжия (University of Aizu, Япония); Г.Гольцмана (МГПУ); Ф.Сизова (ИФП, Киев, Украина). Рыжий провёл всесторонний анализ графена и предложил использовать углеродные слои (графены) для создания приборов – фотоприемников и лазеров для терагерцевой и средней ИК-областей спектра. Им предложен: p-i-n-фотодиод на основе многослойной графеновой структуры для терагерцевой и средней ИК-об-

ласти спектра; лазер с оптической накачкой и вертикальным резонатором Фабри-Перо на эту же область спектра. Рассмотрены многочисленные физические эффекты, возникающие в таких структурах.

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

Квантовая эффективность SSPD в этом диапазоне (от видимого до 1,3 мкм) достигает 30%-ного уровня, ограниченно поглощением пленки NbN, при пренебрежимо малом уровне темновых отсчетов и временном разрешении порядка 20 пс. SSPD хорошо согласуется с оп-

товолокном и легко интегрируется в коммерческую двухканальную приемную систему. Система уже нашла ряд практических применений в экспериментах по оптической когерентной томографии, регистрации излучения от квантовых точек с высоким временным разрешением, а также в квантовой криптографии.

Дальнейшим развитием стал SSPD в виде параллельно соединенных полосок. Такой SSPD обладает принципиально новым свойством – возможностью определять число одновременно поглощенных фотонов по величине фотоотклика детектора, поскольку амплитуда отклика детектора пропорциональна количеству падающих фотонов. Это устройство одновременно позволило увеличить быстродействие детектора. Удалось разработать SSPD с шириной полоски 54 нм, сохранив при этом его сверхпроводящие свойства. Эти детекторы показывают высокую чувствительность на длине волны 5 мкм и демонстрируют однофотонный отклик на 10 мкм.

Сверхпроводниковый терагерцевый смеситель (HEB) на эффекте электронного разогрева в пленках NbN может работать либо в режиме прямого детекти-

рования или как смеситель. На частотах выше 1 ТГц NbN НЕВ-смесители превосходят смесители на основе туннельного перехода сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (SIS) и диоды Шоттки, сочетая лучшую чувствительность и более широкую полосу преобразования, которая достигает 6 ГГц. Получено рекордное значение шумовой температуры приемника – 750 К на частоте 2,5 ТГц. НЕВ-детекторы, работающие в режиме прямого детектирования, имеют время отклика ~50 пс и эквивалентную мощность шума $(NEP) 3 \times 10^{13} \text{ Вт} \times \text{Гц}^{-1/2}$.

Тему фотоприемников терагерцевого диапазона развил в своем докладе «Приемники ТГц излучения и их применение» Ф.Сизов. Эти ФП играют все возрастающую роль в различных областях человеческой деятельности (астрономия, биология, определение химического состава медикаментов и взрывчатых веществ, получение изображений и др.). Рассмотрены вопросы, связанные с развитием и функционированием приемников ТГц-излучения. Обсуждены условия эксплуатации глубокоохлаждаемых и неохлаждаемых приемников ТГц-излучения и их возможные предельные характеристики. Рассмотрены основные физические свойства и современные достижения в параметрах ТГц-приемников излучения с прямым и гетеродинным детектированием сигналов. Внимание уделено приемникам с барьерами Шоттки, SIS-приемникам, сверхпроводниковым болометрам с горячими носителями заряда, приемникам на основе полевых транзисторов и их предельным характеристикам.

Дальнейшее развитие ТГц-тематика получила в докладе А.Свиридова и группы исследователей («НПО «Орион») «Терагерцевые приемные устройства с квантовыми усилителями». Предложены ТГц ФПУ, содержащие квантовый усилитель изображения и матричный приемник (ТПУ с КУ). Разработаны математические модели, позволяющие производить расчеты пороговых характеристик, и проведены расчеты поро-

гов чувствительности этих приемных устройств. При расчетах учитывались зависимости порогов чувствительности ТПУ с КУ от параметров КУ (коэффициента усиления, светосилы, эффективной ширины спектральной полосы усиления и др.), характеристик используемых в них ФП и от методов (электрических или визуальных) регистрации сигналов.

Показана возможность и целесообразность построения активных систем видения с использованием ТПУ с КУ. Использование приемных устройств с квантовыми усилителями в активных ТГц-системах позволит в 10^2 – 10^4 раз увеличить потенциал этих систем.

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

МАТРИЧНЫЕ ФПУ

Данное направление является естественным развитием первоначального направления. Представлены доклады в основном от «НПО «Орион» и ИФП СО РАН. Это «Фотоприемники и фотоприемные устройства на основе антимонида индия формата 320×256» (И.Касаткин, А.Лопухин, А.Дирочка, А.Рябова – «НПО «Орион»); «Монолитный фотоприемный модуль 32×32», (А.Сорочкин и др. – ИФП СО РАН); «Исследование двухспектрального многорядного фотоприемного устройства на основе ГЭС КРТ» (Яковлева и др. – «НПО «Орион»); «Исследование шумов в многорядных фотоприемных устройствах на основе КРТ» (К.Болтарь, В.Полунеев, Н.Мансветов

– «НПО «Орион»); «Проблемы гибридной охладимых матричных ФПУ ИК-диапазона» (В.Ефимов – ИФП СО РАН).

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

Авторами из ИФП СО РАН разработан кристалл, содержащий 32×32 фотоприемных ячеек размером 150×150 мкм², состоящих из КРТ меза-фотодиода и n-МОП транзистора. Кристалл изготавливается по n-МОП технологии с поликремниевыми затворами и с алюминиевой разводкой на пластине кремния. Мультиплексор обеспечивает произвольный доступ к элементам МФПУ, высокую однородность смещения фотодиодов и возможность работы с большими темновыми и/или фоновыми токами. Выбранный фотодиод подключается к общей шине считывания. Мультиплексор обеспечивает считывание с частотой от 4 до 40 кадров в секунду.

Проведено исследование процессов, требуемых для создания монолитного ИК ФП на основе слоев КРТ, выращенных в ячейках кремниевого мультиплексора. Определены оптимальные значения основных параметров операций изготовления монолитного ИК ФП. Исследовано влияние размеров меза-фотодиода на его свойства. Установлено, что зависимость фототока и темнового тока от размера диода проявляется в диапазоне размеров от 30×30 мкм² до 80×80 мкм². При уменьшении размера от 80×80 мкм² до 30×30 мкм² происходит увеличение темнового тока. Фототок спадает прямо

пропорционально уменьшению размера диода.

В НПО «Орион» исследованы параметры двухспектрального ФПУ формата $2 \times 2 \times 288$ элементов, изготовленного на основе гетероэпитаксиальной структуры КРТ. Элементы спектрального диапазона 8–12 мкм располагаются на поверхности МФЧЭ в узкозонном фоточувствительном слое КРТ, а элементы спектрального диапазона 3–5 мкм располагаются в кармане глубиной около 6 мкм в широкозонном фоточувствительном слое КРТ. Гетероэпитаксиальная структура КРТ содержит два фоточувствительных слоя р-типа проводимости толщиной по 6 мкм составов $x=0,27$ и $0,22$, выращенных жидкофазной эпитаксией на подложке CdZnTe. Фотоэлектрические характеристики обоих многорядных фотоприемников формата 2×288 элементов спектральных диапазонов 3–5 и 8–12 мкм близки к теоретическому пределу, обусловленному шумом фонового излучения.

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

Изучены высокочастотный, низкочастотный шум и нестабильность тока всех элементов КРТ МФПУ. Количество фото-

чувствительных элементов с увеличенными шумами и нестабильностью тока существенно увеличивается с увеличением граничной длины волны. Показано, что дефектные элементы с незначительно увеличенным высокочастотным шумом имеют существенно увеличенный низкочастотный шум или нестабильность тока.

Ефимов проанализировал проблемы, возникающие при гибридации охлаждаемых МФПУ. В докладе показано, что по мере увеличения размеров фотоприемных матриц возникают дополнительные задачи, связанные с уменьшением размера микросоединений и расстояний между ними.

СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ

В этом направлении заметен основной доклад «Современное состояние разработки и перспективы развития МКС Сплит-Стирлинг для охлаждаемых ФПУ» М.Лишина и А.Громова (НТК «Криогенная техника», Омск). Изложены результаты разработки ряда модульных микрокриогенных систем (МКС) Сплит-Стирлинг, предназначенных для комплектации тепловизионных приборов.

Разработанные МКС изготавливаются только из отечественных материалов и комплектующих и позволяют криостатировать фоточувствительные элементы ФПУ различного типа на температурном уровне 75–80 К при тепловой нагрузке на МКС от 0,3 до 2,0 Вт. Приведены результаты исследований и испытаний нескольких модифи-

каций модульных МКС в различных условиях, а также проводившейся в последнее время модернизации блоков управления МКС.

В 2010 году завершены испытания МКС космического назначения, обеспечивающей холодопроизводительность более 10 Вт и назначенный ресурс 32000 ч. Приведены результаты разработки интегральной МКС Стирлинга массой менее 600 г с цифровым блоком управления полностью на отечественной элементной базе. Были показаны промежуточные результаты разработки МКС с охладителем с пульсационной трубой и намечены перспективы дальнейшего развития.

Другие доклады, представленные НПО «Орион», Институтом термоэлектричества АН Украины, Аэрокосмическим университетом Самары, посвящены конкретным вопросам МКС, термоэлектрических охладителей, расчета тепловых труб и т.д. Во второй части обзора мы обсудим материаловедческие проблемы чувствительности фотодиодов и их быстродействия, конструкции новых оптико-электронных приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lawson W., Nielsen S., Putley E., Young A. Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe–CdTe. – J. Phys. Chem. Solids, 1959, v. 9.
2. Шнейдер А., Гаврищак И. Структура и свойства системы HgTe–CdTe. – Физика твердого тела, 1960, т. 2, с. 2079.

Продолжение следует