

Фотоэлектроника: элементная база и технология*

УДК 621.384

XX юбилейная конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения

А. И. Дирочка, А. М. Филачёв

ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Приведен сжатый анализ докладов XX Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Обсуждены отдельные доклады по тепловидению, фокальным матрицам, проблемам терагерцового диапазона ИК-спектра, системам обработки информации с фокальных матриц и системам охлаждения приборов, вопросам конструирования электронно-оптических систем, материаловедению для фотоэлектроники, в том числе нанотехнологиям, физическим явлениям и метрологическим проблемам фотоэлектроники и др.

PACS: 85.60.-q

С 27 по 30 мая 2008 г. проведены XX Международная научно-техническая конференция и выставка по фотоэлектронике и приборам ночного видения.

Конференция проходила в ГНЦ РФ ФГУП «НПО "Орион"», который являлся организатором конференции и выставки. Конференцию поддержали: Министерство образования и науки РФ, Российское агентство по промышленности, Федеральное агентство по науке и инновациям, Российская академия наук, Правительство Москвы, Российский фонд фундаментальных исследований, Оптическое общество России.

Тематика конференции:

фотонные и тепловые приемники излучения и формирователи сигналов изображения;

приборы ночного видения (на основе ЭОП и тепловизионные);

микроэлектроника для фотоприемных устройств;

новые направления и последние достижения в фотоэлектронике и приборах ночного видения;

нанотехнологии и метаматериалы в оптике;

специальное программное обеспечение для фотоэлектроники и оптики.

Для участия в конференции было заявлено 270 докладов из 104 организаций (39 зарубежных) из 12 стран.

Тематика докладов охватила вопросы не только фотоэлектроники и приборов ночного видения, но и

оптических приборов и их технологии; технологии фоточувствительных материалов и оптоэлектронных приборов и даже инновационных проблем при разработке и производстве фото- и оптоэлектронных приборов.

Основные направления, рассмотренные на конференции [1, 2]:

- тепловидение: тепловизионные приборы, матричные и субматричные фотоприемные (ФП) устройства (ФПУ) на область 3—5 и 8—12 мкм;
- системы охлаждения оптоэлектронных приборов;
- технология материалов фотоэлектроники и приборных структур;
- нанотехнологии и метаматериалы в оптике и микрофотоэлектронике;
- микроэлектроника считывания и обработки фотосигналов;
- микроболометры;
- фотоэлектрические явления в полупроводниках и полупроводниковых структурах;
- электронно-оптические преобразователи;
- приборы ночного видения;
- приборы для терагерцового диапазона ИК-спектра;
- оптические приборы;
- вопросы метрологии современных оптоэлектронных приборов;
- программное обеспечение фотоэлектронных устройств;
- инновационные процессы в фотоэлектронике.

* Статьи представлены по материалам XX Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения.

Традиционно наиболее широко было представлено тепловизионное направление. Большой интерес вызвали доклады о фотоприемных устройствах для тепловизионных приборов.

Прежде всего это постановочные доклады:

- *"Современное состояние, перспективы и проблемы развития ИК-фотоэлектроники"* — В. П. Пономаренко, А. М. Филачев, Л. Я. Гринченко (ФГУП «НПО "Орион"»);

- *"Новые задачи для эффективного применения ИК-техники"* — Ф. Триболе (SOFRADIR, Франция).

В них проанализировано современное состояние с фотоэлектронными модулями для областей спектра 3—5 и 8—12 мкм на основе различных материалов и структур. Рассмотрены проблемы современного полупроводникового материаловедения фоточувствительных материалов, проблемы технологии ИК-приборов и устройств.

Обсуждены вопросы применения фотоэлектронных модулей в различных условиях, в том числе и в полевых. Основная часть этого направления — исследование матричных фотоприемников для ИК-области. Сюда относятся следующие доклады:

- *"Исследование времени корректируемости для МФПУ на основе InSb"* — В. Ф. Чишко, А. И. Дирочка и др. (ФГУП «НПО "Орион"»);

- *"Неохлаждаемое микроболометрическое фотоприемное устройство формата 320×240 на основе золь-гель VO_x"* — М. А. Демьяненко, Б. И. Фомин, Д. Г. Есаев и др. (ИФП СО РАН);

- *"Инфракрасные фотоприемники второго поколения на основе оптимизированных ГЭС КРТ МЛЭ"* — В. С. Варавин, В. В. Васильев, С. А. Дворецкий и др. (ИФП СО РАН) и многие другие, в том числе нетрадиционные;

- *"Неохлаждаемый матричный приемник ИК-излучения на основе термопневматического микромеханического преобразователя с оптоэлектронной системой считывания"* — А. В. Гельфанд, А. Г. Паулиш, В. Н. Федоринин (ИФП СО РАН);

- *"Приемники ИК-изображения на основе термо-механических наноразмерных мембран"* — В. А. Беспалов, В. А. Федирко, Е. А. Фетисов (МГИЭТ).

В этих докладах изложены результаты работ исследователей и разработчиков ФП и ФПУ из России, Франции, Украины, Польши, Израиля по созданию матричных фотоприемных устройств для основных спектральных диапазонов 1—3, 3—5 и 8—12 мкм на основе халькогенидов свинца (PbS, PbSe), антимонида и арсенида индия (InAs, InSb); твердых растворов теллурида кадмия-ртути (Cd_xHg_{1-x}Te—КРТ); халькогенидов свинца-олова (PbSnTe); силицида платины и на основе квантово-размерных структур с квантовыми ямами и квантовыми точками.

Рассмотрены фотоэлектрические и эксплуатационные характеристики ФПУ со схемами предварительной обработки фотосигналов в охлаждаемой зоне.

Предложены основные области применения матричных ФПУ в оптико-электронной аппаратуре различного назначения;

представлены тенденции развития ИК-фотоприемников.

- По системам охлаждения следует выделить обзорный доклад *"Нетрадиционные методы термостабилизации элементов фото- и микроэлектроники"* — Л. П. Булат (СПб. Университет низкотемпературных технологий). Доклад касался твердотельных охлаждающих систем на основе электро- и магнетокалорического эффектов. Основной вывод — переход к нанотехнологиям позволит создать эффективные и компактные твердотельные многокаскадные электро- и магнетокалорические охладители. Уже сейчас на пленках PbZr_{0,95}Ti_{0,05}O₃ толщиной 0,3 мкм получено $\Delta T = 12$ К.

- Заметный интерес вызвал доклад *"Термоэлектрическое охлаждение для детекторных применений"* — Г. Г. Громов, Л. Б. Ершова (ЗАО "РМТ"), в котором рассмотрены задачи оптимизации ТЭО для детекторов в различных корпусах для нахождения оптимума эффективности охлаждения и надежности конструкции. В других работах от НТК "Криогенная техника", Россия; Thales Cryogenics, Франция; Института термоэлектричества, Украина; Ricor, Израиль и др. рассматриваются в основном микрокриогенные системы (МКС), работающие по термодинамическому циклу Стирлинга. Приведены результаты исследований и испытаний МКС в различных условиях. Исследованы дроссельные бортовые системы и криогенные радиационные холодильники для космических бортовых систем. А. И. Довгялло и др. из СГАУ, Самара, предлагают универсальный газовый баллон для дроссельного охладителя, в 2—2,5 раза увеличивающий время работы последнего.

Рассмотрены ближайшие перспективы совершенствования конструкции МКС и повышения их надежности и технических характеристик.

Технологические проблемы получения материалов и приборных структур фотоэлектроники наиболее полно отражены в цикле докладов ИФП СО РАН:

- *"Разработка элементов технологии монокристаллического инфракрасного фотоприемника"*, *"Выращивание наногетероэпитаксиальных структур КРТ методом молекулярно-лучевой эпитаксии"*, *"ГЭС КРТ МЛЭ с внутренним отрезающим фильтром"*.

Приведены результаты исследований получения монокристаллических структур КРТ и теллурида кадмия размерами от 100×100 до 30×30 мкм на

кремниевой подложке с ориентацией (310) через окна, вскрытые в двуокиси кремния. Сделан еще один шаг к созданию монолитного фотоприемника из КРТ.

- Разработана технология выращивания нано-гетероэпитаксиальных структур КРТ молекулярно-лучевой эпитаксией (МЛЭ) со встроенными широкозонными нанослоями толщиной 0,035 мкм. Предложен метод выращивания эпитаксиальных структур с отрезающим коротковолновым фильтром для уменьшения влияния коротковолновой фоновой засветки как методом МЛЭ, так и комбинацией методов жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) и Metal Organic Chemical Vapor Deposition (МОСVD) (ИХВВ РАН; Гиредмет).

- Продолжены работы по гетероэпитаксиальным слоям КРТ МЛЭ на разных подложках и исследования физико-химических процессов роста, легирования, механизмов образования дефектов, в том числе и при ионном травлении.

- Химическая пассивация как метод подавления поверхностной составляющей темнового тока мелкогабаритных фотодиодов предложена в работе "Химическая пассивация фотодиодов на основе GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb" — Е. В. Куницына, И. А. Андреев и др. (ФТИ РАН). В результате получили подавление темнового тока от 2 до 10 раз.

- В работе А. Э. Климова (ИФП СО РАН) рассмотрены технологические аспекты разработки матричного ФПУ на основе гетероструктур PbSnTe:In/CaF₂/BaF₂/Si для решения задач дистанционного зондирования Земли.

- В докладе В. И. Стафеева "Контакты металл — теллурид кадмия-ртути" (ФГУП «НПО "Орион"») дан анализ взаимодействия различных металлов с поверхностью КРТ. Показано, что электрофизические свойства поверхности КРТ существенно изменяются при напылении металлов. Приведены величины этих изменений для разных металлов.

- Проблеме считывания и обработки фотосигналов посвящено много докладов, основными из которых являются доклады И. И. Ли (ИФП СО РАН), Е. А. Климанова и П. А. Кузнецова (ФГУП «НПО "Орион"»), В. П. Ревы и Ф. Ф. Сизова (ИФП НАНУ, ИМП НАНУ) и др.

И. И. Ли рассмотрел системные и схемотехнические решения построения адаптивных устройств предпроцессорной обработки сигналов в интегральном исполнении, вычитающих аддитивные неинформационные компоненты по каждому каналу, и показал, что предложенные устройства не ухудшают свойства ФПУ.

В докладе Е. А. Климанова и П. А. Кузнецова обосновывается целесообразность развития мультиплексоров по пути создания БИС с первичной

аналого-цифровой (АЦ) обработкой фотосигнала: цифроаналоговой компенсацией темновых токов ФП и АЦ-преобразованием выходного сигнала. Предлагается использовать принцип параллельности для увеличения времени АЦ-преобразования и упрощения схемотехники мультиплексора.

В. П. Рева и Ф. Ф. Сизов рассмотрели влияние конструктивно-технологических ограничений на компоновку основных узлов схемы считывания фотосигнала. Подробно рассмотрена наиболее распространенная схема прямой инжекции. Здесь же приводятся расчеты оптимального соотношения быстродействия и потребляемой мощности выходных усилителей.

Интересна идея "аналоговой конвейерной обработки" для реализации режима ВЗН — хранение информации на емкостях, коммутируемых в определенной последовательности и подключаемых для суммирования к зарядочувствительному усилителю (В. П. Рева и др.).

- Цикл докладов посвящен проблеме коррекции неоднородности многоэлементных ФПУ. В основном это работы В. Н. Солякова с сотрудниками (ФГУП «НПО "Орион"»). Рассмотрены двух- и трехточечная схемы коррекции. Сюда же примыкают методы обработки низкоконтрастных тепловых изображений, в том числе и двухдиапазонной тепловизионной системой.

- Большой интерес вызвала секция по терагерцовому диапазону ИК-спектра. Прежде всего это пленарные доклады В. И. Рыжия (Univ. of Aizu, Япония) "Приемники терагерцового диапазона с использованием плазменного резонанса", Ф. Ф. Сизова "Приемники излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов" и др.

В первом из названных докладов продемонстрирован каскад физических эффектов с участием плазменного резонанса и приведены оценочные параметры возможных фоточувствительных приборов на их основе. В докладе Ф. Ф. Сизова приведены физические свойства и параметры основных приемников излучения для рассматриваемого диапазона длин волн, работающих в режимах прямого детектирования и гетеродинном. Приведены основные характеристики квантовых и тепловых приемников излучения терагерцового диапазона.

- В докладе М. А. Демьяненко и др. (ИФП СО РАН) "Матричные микроболометрические приемники для инфракрасного и терагерцового диапазонов" приведены результаты регистрации различных объектов на просвет и отражение, в том числе и за преградой из диэлектрических материалов с использованием излучения лазера на свободных электронах с длиной волны 130 мкм. По-

казана возможность регистрации движущихся объектов.

- Матричные приемники излучения на квантоворазмерных эффектах. Здесь следует обратить внимание на доклад из ФГУП НИИ "Полюс" — "Двухспектральные матричные фотоприемники на основе структур с квантовыми ямами". Изготовлена матрица 320×256 эл. для диапазонов 3—5 и 8—12 мкм с возможностью регистрации по каждому из каналов. В работе "Фотовольтаический детектор на основе асимметричной гетероструктуры II типа $p\text{-InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/p-GaSb}$ с одиночной квантовой ямой для спектрального диапазона 1,5—3,6 мкм" (ФТИ РАН). Полученные результаты по обнаружительной способности такого ФП соответствуют параметрам коммерческих фотодиодов из арсенида индия.

- Прекрасный обзор "Инфракрасные фотоприемники на квантовых точках: состояние и перспективы" сделал А. Rogalski (WAT, Польша). Изложена ситуация с развитием ИК-ФП на квантовых точках и их место среди других ИК-фотоприемников. Показано, что прогресс в технологии и конструкции ФП на квантовых точках позволит достичь высокой чувствительности и быстродействия, достаточных для практических применений их при комнатных температурах.

Часть докладов была посвящена вопросам метрологии фотоприемников.

- В пленарном докладе Ю. П. Яковлева (ФТИ РАН) сообщается о последних достижениях в разработке мощных ИК-светодиодов для метрологических применений в области 1,6—4,6 мкм. Представлены 2 серии светодиодов — на основе гетероструктуры GaInAsSb/GaAlAsSb для длин волн 1,6—2,5 мкм и на основе InAs(Sb)/InAsSbP для 2,8—4,6 мкм. Для выращивания изопериодных гетероструктур к подложкам GaSb и InAs были использованы методы ЖФЭ и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Технология позволяет создавать светодиоды для всего спектрального диапазона изменением состава активных слоев гетероструктуры.

- Компанией CI Systems Ltd. (Израиль) представлена развернутая программа управления контролем оптико-электронных систем. В работе А. А. Солодкова, С. С. Милосердова (ФГУ "22 ЦНИИ МО РФ") разработан метод автоматизированного тестирования модулей электронной обработки сигналов оптико-электронных приборов.

- Проблемы исследования, разработки и использования приборов ночного видения обсуждались в докладах: "Фотоумножитель с GaAs фотокатодом и кодирующим коллектором для быстродействующих систем формирования изображения в режиме счета одиночных фотонов",

"Энергетическое распределение электронов, эмитированных мультищелочными фотокатодами с отрицательным и положительным электронным сродством" (Совместные работы ИФП СО РАН и ОАО "Катод"); "Модель усиления тока для резистивно-связанных каналов МКП" — А. Б. Беркин, В. В. Васильев (НГТУ Новосибирск); "Система вождения автомобилей ночью" от СКБ ПНВ; "Тепловизионная интеллектуальная система безопасного управления транспортными средствами" (ФГУП «НПО "Орион"», ИПМ РАН); "Активно-импульсный прибор ночного видения для области 0,9—1,7 мкм" — В. М. Белоконев, В. Г. Волков и др. (ФГУП "Альфа") и др.

Фотозлектронные умножители, обладающие однофотонной чувствительностью, реализуются с 2- или 3-я микроканальными пластинами и кодирующим коллектором. Они позволяют реализовать быстродействующие системы формирования изображений мегапиксельного формата.

Разработаны системы безопасного вождения транспортных средств в ночных условиях. Это традиционные системы: на основе ПЗС-матрицы; на основе ЭОП-сочлененного с ПЗС-матрицей; светодиодного осветителя, работающего в непрерывном режиме. Развитием последнего варианта является импульсная система вождения. На основе тепловизионного канала диапазона 8—14 мкм разработана интеллектуальная система для информационного обеспечения безопасного управления транспортными средствами.

- По направлению оптических приборов следует обратить внимание на доклады: "Мультиспектральный тепловизор с фильтрующим устройством на основе наклонного интерферометра Фабри-Перо" (ФГУП «НПО "Орион"»); "Новый гиперспектральный прибор наблюдения наземных и воздушных целей в диапазоне 3—5 мкм на базе интерферометра" (CI Systems Ltd., Израиль) и "Приборы ориентации по Земле на основе неохлаждаемых микроболометрических матричных приемников для космических аппаратов (ПОЗ)" (ОАО НПП "Геофизика – Космос").

В первой работе предложен мультиспектральный тепловизор, отличительной особенностью которого является принципиальная возможность регистрировать быстропротекающие процессы при получении за один кадр мгновенного изображения с "разноцветными строками", т. е. изображения, в котором каждая строка отображает интенсивность излучения определенной длины волны, соответствующей номеру этой строки от оптически сопряженного с этой строкой участка сцены. Подобные устройства могут быть пригодны для получения пространственной и спектральной информации о быстро протекающих процессах. Во втором док-

ладе излагается реализация интерферометрического прибора для работы в области 3—5 мкм.

тельный круг проблем, стоящих перед этой динамически развивающейся наукоемкой отраслью.

Заключение

Отмечен высокий уровень результатов ведущих фирм. Представленные доклады охватывают значи-

Литература

1. XX Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. (27—30 мая 2008. Москва, Россия): Тез. докл. — 253 с.
2. <http://www.orion-ir.ru>

Статья поступила в редакцию 9 октября 2008 г.

XX-th anniversary conference on photoelectronics and devices of night vision

A. I. Dirochka, A. M. Filachev

Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

The compressed analysis of reports of the XX-th international scientific and technical conference on photoelectronics and devices of night vision has been resulted. Discussed are separate reports on thermovision, focal plane arrays, problems of the terahertz range for the IR spectrum, systems of processing the information from focal plane arrays and systems of cooling the devices, questions of designing the electron-optical systems, materiology for photoelectronics including nanotechnologies, the physical phenomena and metrological problems of photoelectronics, etc.

PACS: 85.60.-q

УДК 621.384.3

Современное состояние и перспективы инфракрасной фотоэлектроники

Л. Я. Гринченко, В. П. Пономаренко, А. М. Филачев

ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Проведен анализ состояния разработок и производства инфракрасных (ИК) фотоприемников и фотоприемных устройств (ФПУ). Рассмотрены тенденции в области дальнейшего развития полупроводникового материаловедения для ИК-фотоэлектроники, а также возможности расширения функциональности ФПУ и пути развития их направлений.

PACS 85.60.Gz

Введение

Инфракрасная фотоэлектроника как специального, так и двойного применения — одна из наукоемких и бурно развивающихся областей современной оптоэлектроники. Если видимый диапазон занимает участок спектра от 0,38 до 0,75 мкм, то использование ИК-участка спектра существенно увеличивает объем получаемой информации.

Приборы фотоэлектроники можно разделить на три основные группы:

- на основе кремниевых приборов с зарядовой связью (ПЗС) — фоточувствительных матриц со схемами считывания, обладающих чувствительностью в видимом и ближнем ИК-спектральных диапазонах с границей чувствительности до 1,1 мкм;

- *ночного видения (ПНВ)* на основе электронно-оптических преобразователей (ЭОП), в том числе интегрированных с ПЗС-фотоприемниками, использующими естественную ночную освещенность сцены с чувствительностью в области ~ 1—3 мкм;