

УДК 621.384

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЗАРУБЕЖНЫХ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ

В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков



Виктор Васильевич Тарасов – доктор технических наук, профессор, генеральный директор ОАО «ЦНИИ «Циклон». Хорошо известны его работы в области создания высокочувствительных матричных приемников излучения на основе микроболометрических чувствительных слоев, структур с множественными квантовыми ямами и сверхрешеток типа II. Пионерскими для нашей страны являются работы В.В. Тарасова по созданию плоскостных дисплеев на основе органических светодиодов. Одновременно В.В. Тарасов ведет преподавательскую деятельность, с 2000 г. являясь профессором кафедры оптико-электронных приборов МИИГАиК. Им опубликованы 3 монографии. Он автор и соавтор 38 научных статей, 29 авторских свидетельств и патентов, 7 учебно-методических пособий.



Юрий Григорьевич Якушенков – доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР. С 1972 г. и по настоящее время является заведующим кафедрой оптико-электронных приборов МИИГАиК. С 1985 г. по 2010 г. одновременно с заведованием кафедрой являлся деканом факультета оптического приборостроения МИИГАиК. Научные труды Ю.Г. Якушенкова составляют 21 книгу, более 120 статей, 27 авторских свидетельств на изобретения и патентов. За последние 3 года им опубликованы два учебника, одна монография и 10 статей в реферируемых журналах. Его учебник для оптических специальностей вузов «Теория и расчет оптико-электронных приборов» выдержал шесть изданий, награжден Дипломом почета ВДНХ, переведен на английский язык, удостоен в 2001 г. премии Правительства РФ в области науки и техники. Он является членом президиума Учебно-методического объединения вузов России по образованию в области приборостроения и оптоэлектроники. Член редакционной коллегии журнала «Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики»

Излагаются краткие сведения о программах развития и современном состоянии разработок зарубежных тепловизионных систем и их элементной базы, в первую очередь, оптических систем и фотоприемных устройств. Особое внимание уделяется тепловизионным системам 3-го поколения, работающим в двух и более спектральных диапазонах и использующим матричные фотоприемные устройства. Приводятся примеры разработок тепловизионных систем военного, гражданского и «двойного» назначения. Рассматриваются перспективы развития тепловизионных систем в ближайшие годы.

Ключевые слова: тепловизионная система, оптическая система, фотоприемное устройство.

Введение

Тепловизионная техника и технологии – одно из самых быстро развивающихся направлений оптико-электронного приборостроения. На всех представительных мировых форумах, конференциях, выставках оптико-электронных систем (ОЭС), например, ежегодных конференциях «Оптика для обороны и безопасности», проводимых Международным обществом по оптической технике (SPIE), или на ежегодных Международных форумах «Optics-Euro», организуемых Всероссийским выставочным центром, тепловизионные системы (ТВС) занимают очень большую часть в программах и экспозициях [1].

Большинство ТВС работают в одном, двух и значительно реже – в нескольких диапазонах инфракрасной (ИК) области оптического спектра. В принятых за рубежом обозначениях этими диапазонами с соответствующими граничными длинами волн являются:

- NWIR (Near Wave Infrared) – ближневолновый (0,7–0,9 мкм);
- SWIR (Short Wave Infrared) – коротковолновый (0,9–3,0 мкм);
- MWIR (Middle Wave Infrared) – средневолновый (3–5 мкм);
- LWIR (Long Wave Infrared) – длинноволновый (8–14 или 8–12 мкм).

Показательно, что со времени выхода в свет публикаций [2–4] прошло совсем немного времени, однако ведущие зарубежные компании заметно увеличили номенклатуру устройств, применяемых в ТВС, а также и самих систем.

Наиболее распространенными фотоприемными устройствами (ФПУ) в ТВС продолжают оставаться ФПУ на базе тройных соединений КРТ (кадмий–ртуть–теллур); СКЯ (квантово-размерные структуры – структуры с квантовыми ямами); СР-II (сверхрешетки типа II); МБ (микроболометры). Большое число фирм в 25 странах мира (США, Канада, Великобритания, Франция, Германия, Россия, Израиль, Италия, Индия и др.) занято созданием и совершенствованием ТВС самого различного применения, как военного, так и гражданского [IIN – 2013, № 2, С. 1].

Объем мирового рынка ТВС гражданского применения в 2011 г. вырос на 18% по сравнению с предыдущим годом и составил 3,2 млрд долларов США (\$), хотя рынок ТВС «двойного» (гражданского и военного) применения в 2012 г. увеличился всего на 2% из-за сокращения в США таких крупных программ, как TWS (прицельные системы) и DVE-FOS (системы для ночного вождения). Можно отметить, что объем продаж ТВС в 2012 г., близкий к 7 млрд \$, несколько уменьшился по сравнению с 2011 г. из-за уменьшения военной составляющей бюджета США и ряда европейских стран. Однако в странах Ближнего Востока и Азии он сохранился и будет расти в ближайшие 5 лет [IIN – 2013, № 2, С. 2].

Ожидается, что к 2017 г. рынок продаж ТВС вырастет на 11%, в первую очередь, за счет развития следующих направлений:

- ТВС военного назначения для наземных, воздушных, космических, ракетных и военно-морских комплексов;
- ТВС гражданского и «двойного» назначения, применяемые для управления транспортными средствами, в охранных и антитеррористических системах, в радиометрии и термографии и др.;
- ТВС, работающие активно-пассивным методом и использующие ФПУ на базе InGaAs и МБ;
- разработка более совершенных охлаждаемых матричных ФПУ на базе КРТ, СКЯ и СР-II, в частности, работающих при температурах охлаждения около 150±20 К и обозначаемых как HOT (High Operating Temperature) -ФПУ;
- разработка более совершенных неохлаждаемых матричных ФПУ (МБ).

Таким образом, можно сделать вывод о продолжающемся совершенствовании и расширении круга применения ТВС. Ниже будут показаны основные направления развития этих систем и их элементной базы. В конце статьи будут приведены некоторые примеры ТВС военного, гражданского и «двойного» назначения.

Некоторые программы развития тепловизионных систем

Непрерывно растет число программ развития ТВС и их основных узлов. Так, Директорат вооружений научно-исследовательской лаборатории Военно-воздушных сил США (AFRL/RW) и Агентство противоракетной обороны (MDA) составили список наиболее актуальных областей исследований из 18 наименований, в число которых входят:

- распознавание автономных целей;
- методы и аппаратура для моделирования работы систем защиты от стратегического и тактического ракетного оружия [IIN – 2013, № 1, С. 5];
- совершенствование имитаторов наблюдаемых сцен и разработка на их основе испытательной аппаратуры, с помощью которой можно будет воспроизвести характеристики обнаруживаемых с помощью ОЭС и ТВС целей для различной фоноцелевой обстановки, а также предсказать степень совершенства разрабатываемых систем для имитируемых условий эксплуатации;
- исследование узлов ТВС, работающих активным методом (лидаров или ладаров) – лазеров, приемных систем, систем формирования лазерного излучения, сканирующих систем, дальномеров, систем обработки и распознавания принимаемых сигналов и изображений.

Агентство по перспективным научно-исследовательским разработкам DARPA (США) в 2013 г. создало рассчитанную на 45 месяцев программу создания облегченных (менее 1 кг), дешевых, экономичных и малогабаритных ТВС на базе матричных ФПУ, устанавливаемых на стрелковом оружии и шлемах и предназначенных для значительного повышения характеристик систем обнаружения угроз, распознавания и идентификации целей в дневных и ночных условиях, а также в сложной метеорологической обстановке (программа PIXNET – Pixel Network for Dynamic Visualization) [IIN – 2013, № 2, С. 1]. Предполагается, что нашлемная аппаратура может работать в двух или нескольких спектральных оптических диапазонах (в видимом, NWIR-, SWIR-, MWIR- и LWIR-диапазонах). Системы питания должны обеспечить непрерывную работу в течение четырех или восьми часов с длительностью рабочих циклов в 25%, 50% и 100% от этого времени. Наименьший формат нашлемных ФПУ должен составлять 1280×1024 пикселей (далее размерность опускается), для прицелов стрелкового оружия – 640×480, а частота кадров – 60 Гц.

Программа DARPA рассматривает отдельно возможность создания двухдиапазонных ФПУ с соотношениями 1:1 размеров пикселей, чувствительных в SWIR- и LWIR-диапазонах, при формате 640×512 и 4:1 при форматах 1280×1024 и 2048×1536. В состав разрабатываемой аппаратуры должны входить следующие основные блоки: ОЭС визуализации (камера), беспроводная связь со смартфоном, система объединения получаемых изображений и дисплей. Предполагается, что основу канала, работающего в SWIR-диапазоне (до 1,5–1,7 мкм), могут составить ФПУ на базе InGaAs в сочетании с термоэлектрическими охлаждающими устройствами и системой коррекции неоднородности отдельных пикселей ФПУ.

Очень актуальной остается проблема обнаружения минных полей, которая включена в программу научных и технологических задач Агентства по развитию науки и технологий США (Science and Technology Broad Agency) [IIN – 2012, № 6, С. 12].

DARPA поддерживает программу производства дешевых (стоимостью менее 500 \$) ТВС на базе неохлаждаемых МБ-ФПУ (Low Cost Thermal Imager Manufacturing – LCTI-M). В соответствии с этой программой предусматривается развитие производства дешевой моллированной (изготавливаемой путем горячего прессования) оптики, освоенного фирмой LPT [IIN – 2012, № 7, С. 4], а компания RVS активно работает над созданием МБ формата 1280×1024 с размерами пикселей 12 мкм (далее будем обозначать формат и размеры пикселей как 1280×1024/12) и камер на их основе с массой менее 25 г, объемом не более 3,5 см³ и потребляемой мощностью менее 0,5 Вт [IIN – 2012, № 1, С. 3].

Одновременно DARPA продолжает развивать ранее объявленные программы, например, MANTIS (Multispectral Adaptive Networked Tactical Imaging Systems) [2, 5] применительно к многодиапазонным нацеленной аппаратуре и прицельным устройствам, работающим в широком спектральном диапазоне, от видимого до длинноволнового ИК, и осуществляющим адаптивное объединение цифровых изображений [IIN – 2013, № 2, С. 1].

Принятая в армии США программа создания ряда (линейки) усовершенствованных прицелов (Advanced Weapon Sight Technology – AWST) рассчитана на 28 месяцев [IIN – 2013, № 6, С. 1]. Она предусматривает использование крупноформатных ФПУ с размерами пикселей не более 17 мкм, работающих как в SWIR-диапазоне при низком уровне облученности наблюдаемой сцены, так и в LWIR-диапазоне. Прицелы должны работать в комплексе с встроенным лазерным дальномером, «баллистическим» компьютером и автоматически перестраиваемой прицельной сеткой. Беспроводная видеосистема крепится на шлеме солдата. Нашлемные очки ночного видения осуществляют объединение (смешение) изображений, формируемых электронно-оптическим преобразователем 2-го поколения [6] и тепловизионным МБ-ФПУ 320×240/17 [IIN – 2012, № 6, С. 1]. В рамках программы AWST компания RVS разрабатывает крупноформатные InGaAs-ФПУ форматом 1280×1024/12,5.

Директорат ночного видения и электронных датчиков (NVESD) армии США сформулировал требования к следующему поколению ФПУ для использования их в составе ТВС, предназначенных для наземных систем переднего обзора (Next Gen FLIR B-Kit). Эти системы должны работать в MWIR- и LWIR-диапазонах. Разрабатываемые ФПУ будут иметь формат 860×480/12, а затем 1280×720/12, и размещаться в дьюаровском охлаждающем устройстве с переменной полевой диафрагмой. В состав ТВС должны входить блоки контроля электроники и обработки изображений. Диафрагменное число объектива может изменяться от 2 до 5 при соответствующем изменении фокусного расстояния.

В США принята программа создания пограничных интегрированных комплексов, размещаемых на специальных вышках – Integrated Fixed Towers (IFT). В состав комплексов входят и ТВС [IIN – 2013, № 3, С. 9].

Технический центр стратегического командования обороны армии США по противодействию ракетно-космическим угрозам (U.S. Army Space and Missile Defense Command /Army Forces Strategic Command – OSASMDC/ARSTRATTC) заинтересован в исследованиях, разработке и реализации новых инновационных технологий аппаратного и программного обеспечения комплексов для защиты от всех типов ракет. В [IIN – 2013, № 2, С. 10] приводится большой список разработок, интересующих этот центр, в частности:

- следящие ОЭС;
- органические и полимерные оптические материалы;
- характеристики целей в оптическом диапазоне спектра;
- технологии изготовления оптических и фотоэлектрических компонентов;
- дистанционное зондирование;
- тепловизионные системы и технологии;
- многодиапазонные (многоспектральные) ФПУ;
- обработка сигналов и изображений;
- моделирование и имитация ОЭС;
- облегченные оптические компоненты;
- охлаждающие устройства;

- неохлаждаемые ФПУ;
- совершенствование способов молекулярно-лучевой эпитаксии для изготовления многодиапазонных матричных ФПУ и ряд других [IIN – 2012, № 10, С. 10].

Агентство MDA обратилось к аккредитованным колледжам и университетам или институтам, дающим высшее образование, с призывом проводить исследования и разработки перспективных систем противоракетной обороны (программы MSTAR – Missile Defense Agency and Technology Advanced Research). К числу основных направлений программы, помимо перечисленных выше, входят также лазеры и интегрированные ИК комплексы. Контракты по MSTAR составляют 500 тыс. \$ на 2 года и 700 тыс. \$ на 3 года [IIN – 2012, № 8, С. 4].

В США реализуется обширная программа создания ТВС высокого разрешения в MWIR-диапазоне, предназначенных для обнаружения запусков ракет и космических летательных аппаратов. Задачи, сформулированные в этой программе, содержат:

- технологию выращивания пленочных приемников методами эпитаксии;
- технологию изготовления фотодиодных ФПУ форматов 2048×2048/30 с граничной длиной волны спектральной характеристики 5 мкм и рабочей температурой 130 К; неоднородность пленок и пикселей не должна превышать 1–2%;
- разработку методов и аппаратуры радиометрических испытаний ТВС, включающих определение квантовой эффективности, эквивалентной шуму облученности, эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ), темновых токов, величины и неоднородности чувствительности, вклада схемы считывания и накопления зарядов (СНСЗ) в шум ФПУ.

Реализация программы рассчитана на 33 месяца [IIN – 2012, № 7, С. 7].

На 2013 г. намечены летные испытания ТВС с ФПУ 3-го поколения формата 1280×720 пикселей, разработанных компанией RVS в порядке реализации программы Common Sensor Payload – GPS по развитию беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и армейского разведывательного вертолета ARH. Эта компания в 2007 г. выиграла тендер стоимостью 800 млн \$ со сроком окончания работ в 2016 г. [IIN – 2012, № 1, С. 4].

Через NVESD правительственные организации и армия США собирают информацию о путях создания перспективных ТВС HOT-типа для наблюдения и разведки обширных площадей (5×5 км) в MWIR-диапазоне с частотой выдачи информации 1–5 Гц. При этом наибольший интерес представляют следующие вопросы:

- Какие минимальные размеры пикселей ФПУ могут быть достигнуты в ближайшие три года?
- Как совершенствовать традиционную технологию гибридизации фоточувствительных матриц с очень малыми размерами пикселей и схем накопления и считывания зарядов?
- Как измерить и промоделировать функцию передачи модуляции, перекрестные связи, квантовую эффективность и коэффициенты заполнения ФПУ с очень малыми размерами пикселей?
- Какой наибольший формат может быть достигнут для ФПУ на одном чипе?
- Как оптимально сочетать требования по увеличению частоты кадров и по уменьшению себестоимости крупноформатных ФПУ с малыми размерами пикселей?

Ответы на эти вопросы должны помочь реализовать к 2015 г. крупноформатное ФПУ (4000×4000/5–8) на базе эпитаксиальных технологий [IIN – 2012, № 8, С. 14].

Долгосрочная программа развития, выдвинутая командованием сил специального назначения США (Special Operation Forces), предусматривает развитие таких технологий, как:

- создание камуфляжа обмундирования для отдельного солдата в широком спектральном диапазоне;
- разработка датчиков высокого разрешения для обнаружения и слежения за целями в видимом и ИК диапазонах;
- разработка адаптивных и всепогодных систем ночного видения;
- создание необнаруживаемых электромагнитных систем связи [IIN – 2012, № 6, С. 11].

Федеральное агентство Германии по оборонным технологиям и их обеспечению (Federal Agency for Defense Technology and Procurement – BWB) развивает программу создания тепловизионных прицелов различных видов для разведки и обнаружения целей на больших расстояниях, сочетаемых с безопасным для глаза лазерным дальномером, цифровым магнитным компасом, цифровой системой контроля огня и беспроводной линией связи.

В Канаде реализуется программа внедрения ТВС в транспортные средства, прежде всего воздушные (Entranced Flight Vision Systems – EFVS), которая предусматривает использование в плохих погодных условиях нашлемных ТВС на базе МБ фирмы Max-Viz. Общая стоимость таких систем составляет около 100 тыс. \$ [IIN – 2012, № 4, С. 4].

Современное состояние ОЭС и ТВС 3-го поколения

К настоящему времени практически реализованы значения параметров ОЭС и ТВС 3-го поколения, которые 10 лет назад рассматривались как перспективные [5, 7], а именно:

- формат ФПУ – 1280×720;
- частота кадров – 60 Гц;
- частота просмотра внутреннего кадрового окна – 480 Гц;
- диафрагменные числа объективов $K=2,5$ для широкого углового поля $3,85^\circ \times 2,2^\circ$ и $K=6$ для узкого углового поля $1,6^\circ \times 0,9^\circ$;
- размер пиксела матричного приемника излучения – 20 мкм;
- рабочие спектральные диапазоны – 3,4–5,0 и 7,8–10,5 мкм;
- ЭШРТ при температуре фона 300 К – 35 мК (при $K=6$), 25 мК (при $K=2,5$);
- динамический диапазон – 78 дБ;
- диапазон температур наблюдаемой сцены – 227–360 К;
- рабочая температура (температура охлаждения) ФПУ – более 80 К.

Рассмотрим примеры такой реализации применительно к основным узлам современных ОЭС и ТВС – их оптическим системам и ФПУ.

Оптические материалы и оптические системы

Основная тенденция развития оптических систем ТВС просматривается в стремлении создавать системы, способные работать в широком спектральном диапазоне, что необходимо для разработки двух- и многодиапазонных ОЭС и ТВС без существенного усложнения их конструкции [5]. При этом большое внимание уделяется снижению массы и габаритов оптических систем, а также их стоимости. Для систем, работающих в различных оптических диапазонах, важно достижение малого сдвига плоскости изображений при переходе от одного диапазона к другому.

Продолжают привлекать большое внимание вопросы атермализации оптических систем [8], в частности, возможность применять пассивную атермализацию путем использования линз из халькогенидных и других оптических материалов с оправками из алюминия, что особенно важно для многодиапазонных линзовых и зеркальных систем [IIN – 2012, № 3, С. 3].

Компания LPT продвигает на рынок оптические детали и компоненты, изготавливаемые путем моллирования (горячего прессования) из халькогенидных стекол GeAsSe и GaSbSe, позволяющих улучшить атермализацию объективов ТВС, поскольку показатели преломления этих стекол мало зависят от температуры. Компоненты, изготовленные из таких стекол, имеют меньшую массу, нежели распространенные германиевые компоненты. При изготовлении асферических и гибридных линз компания пользуется алмазным точением [IIN – 2013, № 2, С. 4].

Фирма Murata Manufacturing (Япония) развила удешевленный технологический процесс моллирования германиевых и кремневых линз при температуре 400°C и 730°C соответственно. Изготовленные по этой технологии линзы обладают почти такой же функцией передачи модуляции, что и линзы, изготавливаемые традиционным методом полирования [IIN – 2012, № 2, С. 2].

Для 3-го поколения ТВС вождения в ночных условиях разрабатываются объективы из халькогенидных линз (компания Umicore) и из кристаллического германия (компания Ophir) [IIN – 2012, № 5, С. 3].

Компания InView Technology (США) продолжает исследовать технологии изготовления микрозеркальных матриц большого формата – до 1024×768, используемых в качестве модуляторов потоков, собираемых на отдельные пиксели InGaAs-ФПУ, работающих в коротковолновом ИК диапазоне [IIN – 2012, № 12, С. 6].

Не ослабевает интерес к панорамным оптическим системам [2, 9–11], хотя большинство из публикаций последнего времени посвящено системам с оптико-механическим сканированием, а не панорамным объективам, работающим в статическом режиме. Так, компания L-3 CE сообщает о создании ТВС с панорамным полем обзора (360°) по одной из координат с вращающейся камерой на базе InSb-ФПУ формата 1280×1024. В поле 360° формируются 24 отдельных кадра, строящихся в единой фокальной плоскости (плоскости изображения сцены). Частота кадров составляет 2,5 Гц [IIN – 2013, № 2, С. 8].

В ИК модуле «Attica», разработанном компанией Cassidian Optronics GmbH (прежнее название – Carl Zeiss Optronics), для перископа командира танка «Leopard 2», используется матричное КРТ-ФПУ 384×288/25. Применение в этом модуле 2×2-микросканирования [6] позволило увеличить эффективный формат до 768×576 [IIN – 2012, № 12, С. 2].

Фотоприемные устройства

ФПУ на базе тройных соединений КРТ. Усилия многих разработчиков КРТ-ФПУ в последние годы направлены на увеличение их пространственного разрешения, удешевления за счет замены материала подложек – GaAs вместо CdZnTe, что позволяет увеличить площади подложек более чем в два раза, а также на создание более совершенных двух- и трехдиапазонных ФПУ [12–16].

Для MWIR-диапазона выпускаются КРТ-ФПУ форматов 640×512/20, 1280×1024/12 (компания Barbara Focalplane), 1280×720/15 (Raytheon).

Компания SG разрабатывает двухдиапазонные (для MWIR и LWIR-диапазонов) КРТ-ФПУ форматов 640×512/20, 640×512/24, 860×480/20. Для производства КРТ-ФПУ, работающих при температуре охлаждения T_0 более 220 К (MWIR-диапазон) и имеющих формат 1024×768/16, используется эпитаксия из

металлоорганической вакуумной фазы. Последней разработкой SG явилось КРТ-ФПУ для MWIR-диапазона формата 1920×1280/12, в котором пиксели схемы считывания и накопления расположены вдоль одной из коротких сторон мозаики фоточувствительных пикселей, что заметно увеличивает коэффициент заполнения ФПУ [IIN – 2012, № 12, С. 1].

Совместно с фирмами Caeleste и Easics (Бельгия) SG по заказу Европейского космического агентства развивает производство крупноформатных КРТ-ФПУ, охлаждаемых до 77 К и чувствительных в NWIR- и SWIR-диапазонах [IIN – 2012, № 6, С. 5].

ФПУ на базе структур с квантовыми ямами (СКЯ-ФПУ). Круг применений СКЯ-ФПУ расширяется благодаря их относительно низкой стоимости и высокой стабильности и однородности параметров, даже при меньшей, чем у КРТ-ФПУ, квантовой эффективности [17]. Эти ФПУ непрерывно совершенствуются. Так, компания TRT заметно улучшила параметры двухдиапазонных СКЯ-ФПУ, работающих на длинах волн 4,6 и 8,6 мкм [IIN – 2013, № 3, С. 4]. Новые ФПУ выполняются в гибридном исполнении. Они используют систему охлаждения фирмы Sofradig. В СНСЗ применяются емкостные трансимпедансные усилители с точным контролем смещения. Одни и те же усилители используются в MWIR- и LWIR-диапазонах. Совершенствование СНСЗ заключается в использовании двух выходов (по 10 мегапикселей на каждый), увеличении частоты кадров до 100 Гц, снижении числа шумовых электронов до 228 в MWIR- и до 1100 в LWIR-диапазонах. Величина ЭШРТ в обоих диапазонах – менее 50 мК, время накопления – 7 мс, процент годных пикселей – 99,5, рабочая температура – 70 К.

ФПУ на InGaAs. Эти ФПУ в последнее время привлекают к себе большое внимание, поскольку они работают в SWIR-диапазоне, широко используемом для создания ТВС активно-пассивного типа и систем «двойного» назначения. Появилось много сообщений о разработке крупноформатных матричных ФПУ на лавинных InGaAs-фотодиодах [18, 19]. Такие ФПУ могут обеспечить $\lambda_{\text{пр}}=2,2$ мкм и полосу пропускания частот до 25 ГГц [IIN – 2012, № 12, С. 5].

Компания RVS разработала InGaAs-ФПУ для работы в видимом, NWIR- и SWIR-диапазонах формата 1280×1024/20 [IIN – 2012, № 1, С. 2].

Матричные ФПУ на лавинных InGaAs-фотодиодах производятся компанией SBC. Они предлагаются для работы в составе ладаров автономных БПЛА и других робототехнических комплексов. Частота кадров этих устройств составляет 5–6 Гц, поле обзора – 60°×30°. При работе на дальности 20 м их разрешение в плоскости сцены составляет 45 см на один пиксел. Эта же компания для работы в 3D-пространстве предлагает матрицы на лавинных InGaAs-диодах, работающих в режиме счета одиночных фотонов [IIN – 2012, № 2, С. 4].

Компания Xenics (Бельгия) запустила в производство неохлаждаемые InGaAs-ФПУ, работающие в спектральном диапазоне 0,85–1,6 мкм и имеющие очень малое время накопления зарядов – менее 80 нс. Эти ФПУ сочетаются с системой обработки и коррекции изображений в реальном масштабе времени. Частота кадров составляет 28 Гц. При охлаждении до 77 К такие ФПУ формата 640×512/20 имеют очень низкий уровень шума – до 5 электронов в секунду, однако частота кадров при этом резко уменьшается – до 2,5 Гц [IIN – 2013, № 3, С. 2].

Компанией FLIRS создана ТВС Tau SWIR для работы в SWIR-диапазоне с форматом InGaAs-ФПУ 640×512/15. Потребляемая Tau SWIR-мощность – менее 4 Вт, масса – менее 130 г, габаритные размеры – 3,8×3,8×4,8 см [IIN – 2013, № 3, С. 3].

ФПУ на основе сверхрешеток типа II (СР). Известные преимущества ФПУ на СР перед КРТ-ФПУ и СКЯ-ФПУ, а именно, лучшая однородность, более простая технология изготовления, возможность поглощать падающее по нормали излучение, уменьшенная скорость Оже-рекомбинации, возможность более просто изменять граничную длину волны, особенно сильно стимулируют развитие этих устройств [2].

В последние годы появился ряд сообщений о разработке двух- и многодиапазонных СР-ФПУ. Так, в NU были созданы фотодиодные InAs/GaSb-ФПУ, имеющие квантовую эффективность $\eta=50\%$ в MWIR- и LWIR-диапазонах с $\lambda_{\text{пр}}=4,8\text{--}5,0$ и 11,0 мкм соответственно. Формат ФПУ для MWIR-диапазона составил 640×512/15 [IIN – 2012, № 8, С. 4]. При комнатной температуре такие ФПУ имеют удельную обнаружительную способность $D^*=1,7 \cdot 10^{10}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2}. При $T_0=150$ К они имеют $D^*=10^{13}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2} [IIN – 2012, № 4, С. 2].

В NU разработаны двухдиапазонные СР-ФПУ формата 1000×1000, работающие при $T_0=68$ К (MWIR- и 81 К (LWIR-диапазоне) с ЭШРТ 19 мК и 27 мК соответственно, при диафрагменном числе объектива $K=2$ и времени накопления 0,13 мс при $\eta=81\%$ [IIN – 2013, № 3, С. 8].

Компания IRC выпускает ТВС для научных исследований на базе СР-ФПУ формата 640×512/20, которая может работать в широком спектральном диапазоне 2,5–11,5 мкм или отдельно в MWIR- или LWIR-диапазонах, выделяемых сменными оптическими фильтрами. Частота кадров может достигать 475 Гц. Стоимость камеры – около 200 тыс. \$ [IIN – 2012, № 9, С. 4].

В [IIN – 2012, № 2, С. 3] сообщается о разработке институтом KRISS (Республика Корея) двухдиапазонного (MWIR- и LWIR-диапазоны) ФПУ на базе СР (InAs/InGaSb) формата 320×256, имеющего

ЭШРТ, равную 100 мК при температуре 77 К. Совместно с UNM (University of New Mexico) KRISSE разработал для MWIR-диапазона ФПУ формата 320×256, имеющее ЭШРТ 23,8 мК при диафрагменном числе объектива $K=4$ и температуре охлаждения 77 К.

Исследователи из JPL достигли увеличения граничной длины волны спектральной характеристики СР-ФПУ на InAsSb до 6 мкм за счет использования квантовых точек в InSb при $T_0=225$ К [IIN – 2013, № 3, С. 1]. В большинстве известных ФПУ на InSb и КРТ, работающих при $T_0=150$ К, эта длина волны ограничивается примерно 4,2 мкм.

Матричные ФПУ, работающие при температурах охлаждения выше 150±20 К (НОТ-ФПУ). Эти ФПУ в последние годы привлекают большое внимание, поскольку увеличенная T_0 позволяет значительно уменьшить габариты, массу, энергопотребление и стоимость ТВС, а достаточно хорошо отработанная технология изготовления ФПУ на базе материалов группы A_3B_5 и возможность производить подложки приемников больших размеров обеспечивают им преимущества перед КРТ-ФПУ, работающими в том же MWIR-диапазоне [19]. Очень важно, что охлаждающие устройства НОТ-ФПУ по сравнению с криогенными устройствами, создаваемыми T_0 менее 90 К, имеют существенно больший срок безотказной наработки. Это также снижает стоимость всей ТВС и упрощает ее конструкцию. Как пример, в [IIN – 2012, № 4, С. 1] указывается, что объем охлаждающей системы ТВС на базе НОТ-ФПУ, разработанной компанией L-3 SE, составляет 290 см³, а для ТВС на базе InSb – 1700 см³. Ожидается, что совершенствование охлаждающих устройств, подобно тем, что работают совместно с НОТ-ФПУ, приведет к заметному расширению рынка ТВС гражданского и «двойного» назначения в ближайшие 5 лет [IIN – 2012, № 6, С. 7].

Сегодня НОТ-ФПУ разрабатываются на базе ряда материалов – InAs/GaSb (СР), InAsSb (фотодиоды, HgCdTe (КРТ) и InSb.

Компания LMSBF выпустила на рынок гражданской продукции НОТ-ФПУ для MWIR-диапазона (3,0–4,2 мкм), работающее в сочетании с системой охлаждения по циклу Стирлинга (T_0 до 135 К), имеющей срок наработки более 20000 ч. Система потребляет около 5 Вт. В ФПУ используются материалы n-типа (InAs и барьеры между слоями AlAsSb или InAsSb). Формат ФПУ – 1280×1024/12. Компания NS создала работающую в диапазоне 3,6–4,9 мкм ИК камеру с массой менее 1,5 кг на базе этого ФПУ. В другой камере той же компании используется InSb-ФПУ формата 640×512/15. Последняя имеет ЭШРТ порядка 30 мК при $T_0=95$ К. Масса этой камеры – 335 г [IIN – 2012, № 2, С. 2].

Компания DRST выпускает ИК камеру Zafiro 640 с НОТ-ФПУ на КРТ формата 640×480/12, работающую в MWIR-диапазоне при $T_0=120$ К. Масса камеры – менее 1,2 кг [IIN – 2013, № 3, С. 5]. Эта же компания предполагает использовать КРТ-ФПУ формата 640×512/12, работающую при $T_0=120$ К, создаваемой линейным криоохладителем типа Стирлинга со сроком службы 17000 ч, для разработки ручного целеуказателя с массой менее 0,9 кг.

Неохлаждаемые ФПУ. Неохлаждаемые и сравнительно дешевые ФПУ на базе МБ продолжают заметно совершенствоваться в последнее десятилетие. Достигнутое уменьшение размеров пикселей МБ привело к увеличению формата матриц при сохранении высокой чувствительности [20–22]. Сегодня в ряде компаний разработаны крупноформатные МБ-ФПУ с размером пикселей менее 25 мкм и ЭШРТ менее 30–50 мК, с преобразованием «аналог–цифра» внутри чипа ФПУ, значительно увеличенным динамическим диапазоном и заметным уменьшением тепловой постоянной времени. Например, компания RVS создала такие МБ-ФПУ формата 2048×1536/17.

Создание МБ с размерами пикселей 17 мкм позволило достичь для ТВС с МБ-ФПУ больших дальностей распознавания целей, чем для ТВС 2-го поколения, в которых используются охлаждаемые ФПУ и оптико-механическое сканирование [IIN – 2013, № 3, С. 6].

Сообщается, что компания DRST вслед за выпуском в 2011 г. миниатюрной ТВС Tamarisk 320 на VO_x -МБ формата 320×240/17 выходит в 2013 г. на рынок с миниатюрной ТВС Tamarisk 640 формата 640×480/17. Габариты этой ТВС – 46×40×31 мм, масса – менее 60 г, энергопотребление – менее 1,5 Вт. Камера может работать с частотой кадров 30 или 9 Гц. Ее ЭШРТ составляет менее 50 мК при диафрагменном числе объектива $K=1$. Она снабжена сменными объективами с фокусными расстояниями от 14,25 до 65 мм и угловыми полями от 44° до 9,6°, соответственно [IIN – 2012, № 5, С. 4].

Компания UI разработала ряд МБ-ФПУ форматов 160×120/17, 384×288/17, 640×480/17 и 1024×768/17 с ЭШРТ порядка 40 мК при постоянной времени менее 10 мс. Энергопотребление этих ФПУ снижено до 60 мВт по сравнению с 110 мВт у выпускавшихся ранее МБ-ФПУ формата 384×288/25 [IIN – 2012, № 8, С. 7]. Компания CEA/Leti (Франция) по четырехлетнему контракту объемом 26 млн евро разрабатывает ФПУ с такими же форматами, но размерами пикселей 12 мкм [IIN – 2012, № 2, С. 2].

В самое последнее время появилось сообщение о том, что наряду с МБ на традиционных материалах (VO_x и α -Si) создаются первые образцы МБ формата 640×480/12 на $VNiO_x$, у которого температурный коэффициент сопротивления в два раза больше, чем у VO_x .

Наряду с МБ продолжают развиваться и некоторые другие типы неохлаждаемых ФПУ. Так, компания TSB продолжает совершенствовать неохлаждаемые ФПУ на основе КД-диодов (кремний на диэлектрике) [2, 23]. Сообщается о создании таких ФПУ формата 320×240/22 с СНСЗ, помещенной на той

же подложке, что и фоточувствительные пиксели. В СНСЗ применена двойная коррелированная выборка в сочетании с дифференциальным усилителем вместо одного транзисторного усилителя и аналого-цифрового преобразователя, что уменьшило зависимость выходного сигнала от температуры.

При разработке ФПУ очень большого формата создание столь же крупноформатных СНСЗ становится отдельной проблемой. Работы по ее решению ведутся рядом компаний. Можно отметить в качестве примера СНСЗ форматов $640 \times 512/25$ и $1280 \times 1024/12,5$, предложенные компанией МТ для гибридных InGaAs-ФПУ, а также другие СНСЗ для ФПУ, работающих в MWIR- и LWIR-диапазонах.

Продолжаются работы по созданию неохлаждаемых гибридных систем ночного видения [6], в которых изображение, создаваемое на фотокатоде электронно-оптического преобразователя, через микроканальную пластину поступает на ПЗС-приемник [IIN – 2012, № 6, С. 3].

Новые физические принципы работы ФПУ. Компания Tanner Research (США) предложила МБ нового типа (наноболометр), в котором поглощение излучения происходит в металлических наночастицах, работающих как оптические резонаторы. Резонансные частоты зависят от материала частиц, их размеров и формы. Падающее на них ИК излучение вызывает изменение электрического поля вокруг наночастиц. Этот принцип был реализован на примере одноэлементного болометра для длины излучения 1,5 мкм [24].

В [24] приводятся сведения о разработке ФПУ на основе PbSe, полученного осаждением из паровой фазы (VDP). Формат опытных образцов ФПУ достигал 32×32 , а частота кадров – более 2 кГц. Достоинствами таких ФПУ являются высокое быстродействие, отсутствие охлаждения, совместимость с технологией кремниевых комплементарных структур металл–оксид–полупроводник (КМОП), однородность пикселей, невысокая стоимость. В перспективе разработчики ожидают увеличения формата, уменьшения размеров пикселей, доведения частоты кадров до 20 кГц и выше.

Исследования, проводимые в компании RTI International (США), посвящены разработке дешевых ФПУ для SWIR-диапазона, основанных на гетеропереходах в фуллерене PbS-C60. Опытные одноэлементные образцы обладали $\eta=20\%$ в диапазоне 0,4–1,4 мкм. Величина D^* составила $5 \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$, а плотность темнового тока при комнатной температуре – 130 нА/см^2 . Ожидается, что такие ФПУ могут иметь $D^*=10^{13} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ и работать в спектральном диапазоне 0,25–2,2 мкм. Формат их может составить 1000×1000 , а стоят они могут около 1000 \$ [IIN – 2012, № 6, С. 4].

Некоторые примеры разрабатываемых сегодня ТВС

Двухдиапазонные ТВС активно-пассивного типа

Продолжается совершенствование систем активно-пассивного типа для военных и гражданских применений, в которых активный канал включает генератор излучения (обычно – лазер), облучающий сцену (обнаруживаемые или наблюдаемые объекты) и работающий, как правило, в NWIR-, SWIR- или LWIR-диапазонах. В пассивном канале обычно принимается собственное излучение объектов в MWIR- или LWIR-диапазонах [2, 12]. Часто пассивный канал используется для предварительного обнаружения целей, а активный, обладающий принципиально более высоким пространственным разрешением, – для распознавания и идентификации целей. Кроме того, активный канал используется для локации объектов, что позволяет получать трехмерную информацию в «смотрящем» режиме, т.е. без механического сканирования. Хорошо известными системами такого типа являются лазерные локаторы (ладары).

Совсем недавно появилось сообщение о разработке в университете NU ФПУ для активного канала этих систем на базе InAs/GaSb-CP-II формата 320×256 [IIN – 2013, № 2, С. 5]. При диафрагменном числе $K=2,3$ и времени накопления 10 мс для рабочей температуры 140 К в MWIR-диапазоне была получена ЭШРТ в 49 мК. Для температуры 110 К ЭШРТ уменьшилась до 13 мК при времени накопления 30 мс. Чувствительность SWIR-канала ограничивалась шумами системы считывания при температуре 150 К.

Системы военного назначения

Среди ТВС самого различного военного назначения можно выделить несколько групп, привлекающих наибольшее внимание потребителей и разработчиков. К ним можно отнести:

- системы разведки, обнаружения, целеуказания и прицеливания, устанавливаемые как на легком стрелковом оружии, так и на стационарных или передвижных наземных или морских носителях (бронетранспортеры, танки, суда и др.);
- системы воздушного и космического базирования (самолетные, вертолетные, на БПЛА и др.), решающие те же задачи разведки, прицеливания, контроля огня и т.д.;
- наземные, воздушные и космические навигационные системы и системы вождения (управления) транспортных средств;
- системы защиты от поражающих средств противника.

Сюда же можно отнести системы обнаружения различных химических соединений, радиационной угрозы, противопожарные, охранные и правоохранительные ТВС, которые являются во многих случаях системами «двойного» назначения.

При рассмотрении в начале этого обзора программ развития ТВС, а затем их основных узлов и требований к ним указывались современные пути их практической реализации и приводились параметры некоторых из них.

Системы наземного базирования. Всепогодные прицелы круглосуточного действия, устанавливаемые на стрелковом оружии, продолжают создаваться многими зарубежными производителями. Эти прицелы служат также для разведки и контроля огня. Они сочетаются с нашенными очками ночного видения. Одной из основных задач, стоящих перед их разработчиками, является уменьшение времени распознавания цели, что должно на 50% повысить безопасность и выживаемость солдата-оператора [IIN – 2013, № 3, С. 7].

Примером систем, входящих в снаряжение солдата будущего, являются ТВС, разрабатываемые компанией RM по заданию бундесвера. Начатая в 2012 г. разработка включает в себя создание нескольких блоков. В их число входит система разведки и прицеливания на больших расстояниях, предназначенная для командира группы или снайпера. Эта ТВС строится на базе КРТ-ФПУ формата 640×512 и работает в MWIR-диапазоне в сочетании с лазерным дальномером, цифровым магнитным компасом, системой глобального позиционирования GPS и беспроводной линией связи [IIN – 2013, № 3, С. 14].

Правительство США развивает трехлетнюю программу создания ИК бинокля со следующими параметрами:

- угловое поле: широкое – не менее $12^\circ \times 9^\circ$, узкое – максимально $4^\circ \times 3^\circ$;
- минимальный формат ФПУ на InSb – 640×480;
- два рабочих спектральных диапазона – 3–5 и 8–12 мкм.

Бинокль должен входить в комплекс, в составе которого предусмотрены безопасный для глаза лазерный дальномер (измеряемая дальность до 4 км), система глобального позиционирования GPS, цифровой магнитный компас с разрешением 1° . Габариты всего комплекса – не более 29×30×12 см, масса – до 6 кг, энергопитание – от элементов со сроком службы более 3 ч [IIN – 2012, № 9, С. 9].

Другой разработкой, поддерживаемой армией и корпусом морской пехоты США, является создание облегченного бинокля для работы в видимой области (датчик изображения формата 700×400 пикселей с переменным увеличением 5^\times) и в LWIR-диапазоне (МБ формата 320×240 с переменным увеличением 2^\times). В состав бинокля массой менее 3 кг должны входить лазерный дальномер (дальность действия более 2,5 км), GPS-система и цифровой компас. Бинокль должен работать при температуре окружающей среды -25°C – 50°C [IIN – 2012, № 6, С. 11].

Компания Sagem поставила французской армии 150 многофункциональных всепогодных ИК биноклей дальнего действия нового поколения. Они обеспечивают видение днем и ночью и предназначены для обнаружения противника, точного целеуказания, разведки и дальнометрирования. Бинокль имеет встроенный приемник GPS и беспроводную линию связи [25].

Целям разведки, распознавания и идентификации целей, а также определения их координат служит работающая в MWIR-диапазоне ТВС переменного увеличения Sofue XF, созданная компанией Thales. Формат охлаждаемого ФПУ составляет 384×288 [IIN – 2013, № 3, С. 15].

Новые средства камуфляжа. Наряду с совершенствованием ТВС обнаружения, распознавания и идентификации различных целей создаются новые средства противодействия этим системам. Так, компания SSZCTL (Швейцария) развивает технологии камуфляжа обмундирования солдат за счет снижения излучательной способности поверхности одежды путем использования металлотканых материалов, подобных шерсти, и специальных покрытий. Использование этих материалов снижает заметность объекта более чем на 60%. Эффективные наблюдаемые температуры людей, одетых в такое обмундирование, могут снижаться до 12 – 21°C [IIN – 2012, № 6, С. 2].

Системы воздушного и космического базирования. Как отмечалось выше, ТВС продолжают рассматриваться как одно из средств решения многих задач, стоящих перед военно-воздушной и ракетно-космической техникой, а также перед системами разведки и противодействия ракетным угрозам. Космические ОЭС и ТВС разведки играли и играют важную роль при обнаружении запусков ракет, для чего преимущественно используется SWIR-диапазон. Для отслеживания первых этапов полета баллистических ракет (на высотной и заатмосферной стадиях полета) оптимальным считается MWIR-диапазон, а для слежения за «холодными» отделяющимися блоками – LWIR- и сверхдальний ИК диапазоны.

Примером одной из ОЭС, служащих для навигации, обзора окружающего пространства, обнаружения ракетных угроз и огневых средств противника может служить обзорная ТВС для самолета-истребителя F-35 II, базирующаяся на шести отдельных крупноформатных InSb-ФПУ (640×480 или 1000×1000 фирмы L-3 CE), просматривающих поле обзора 360° в MWIR-диапазоне [IIN – 2012, № 9, С. 4; IIN – 2013, № 3, С. 13].

Та же компания в партнерстве с SG создает первую из восьми ИК систем подавления ракетных средств вероятного противника, развиваемых по заданию армии США. В частности, разрабатывается система защиты вертолетов от портативных носимых средств поражения на базе НОТ-КРТ-ФПУ формата 384×288, работающая в MWIR-диапазоне.

Компании RVS и Boeing разработали неохлаждаемое МБ-ФПУ формата 640×480 для использования в ТВС ракетных следящих комплексах [IIN – 2012, № 9, С. 5].

Компания L-3 IOS (США) заключила контракт стоимостью 8,9 млн \$ на разработку ИК датчика, работающего в MWIR-диапазоне. Датчик устанавливается на БПЛА, предназначенном для разведки и имеющем размеры 3,4×1,0×4,3 м. Высоты полета могут достигать 4,5 км, а скорость – 230 км/ч. Датчик обладает пространственным разрешением, достаточным для обнаружения живой силы и военной техники [IIN – 2012, № 12, С. 7].

Для работы в составе БПЛА компания OOS (США) разработала ИК камеру, в которой предусмотрены системы коррекции неоднородности отдельных пикселей, компенсации неработающих пикселей, автоматического контроля экспозиции, адаптивного контроля динамического диапазона выходных сигналов. В камере используется стандартная схема считывания и накопления зарядов ROIC фирмы Indigo/FLIR [IIN – 2012, № 11, С. 12].

Компания AV (США) получила контракт на 16,5 млн \$ для разработки к концу июня 2013 г. ТВС для БПЛА RQ-11B Raven, запускаемого с рук. В датчике используются МБ компании FLIR 640×480/17, а также лазерный целеуказатель, совмещенный с камерой видимого диапазона [IIN – 2012, № 11, С. 8].

Системы вождения автомобилей и военной техники. Фирма Autoliv предлагает в 2013 г. двухдиапазонную систему ночного видения для вождения автомашин нового класса Mercedes-Benz. Видение в LWIR-диапазоне осуществляется с помощью МБ на окиси ванадия 320×240/17, разработанного FLIR. Для активного канала, работающего в условиях естественной ночной освещенности, используется NWIR-диапазон. Пешеходы на пути будут обнаруживаться на расстоянии до 160 м, а крупные животные – до 100 м. В 2014 г. компании BMW и Audi предполагают оснастить свои новые автомашины системами ночного видения, работающими только в LWIR-диапазоне. Предполагается, что цена такой системы составит около 2500 \$ [IIN – 2013, № 1, С. 2].

Для вождения военной техники постоянно разрабатываются все новые ТВС. Так, компания SG предлагает крупноформатные ФПУ 1920×1080/12. Компания DRS также производит ряд систем для вождения, а именно:

- систему DVE Wide, состоящую из трех широкопольных подсистем с угловыми полями 40°×30° и ФПУ формата 640×480 и обеспечивающую поле обзора 107°×30° (вместо существующего стандартного поля 40°×30°);
- систему DVE Ultra Wide, состоящую из двух систем переднего обзора с угловыми полями 40°×30°;
- систему DVE Ultra Wide с объективом типа «рыбий глаз», имеющим угловое поле 114°×98° [IIN – 2012, № 11, С. 3].

Примеры ТВС «двойного» и гражданского применения

В литературе содержится много примеров эффективного использования ТВС «двойного» и гражданского применения для решения важных задач в самых различных областях [2, 5, 6, 26–36]. Можно привести еще несколько, сведения о которых появились в 2012–2013 г.г.

Медицина. Для оптической когерентной томографии компания UTC Aerospace Systems (США) предлагает новую цифровую камеру, работающую в SWIR-диапазоне (SD-OCT), в которой применены линейные ФПУ на базе InGaAs из 2048 пикселей с размерами 10 мкм. Камера может отсканировать более 76000 линий в секунду. Предполагается использовать камеру в офтальмологии, а также в волоконно-оптических спектрометрах [IIN – 2013, № 11, С. 6].

Для офтальмологических применений компания Bay Spec (США) предлагает ИКС, работающую на длине волны 1,31 мкм и позволяющую наблюдать внутриглазные полости, включая сетчатку, макулу, глазные нервы с разрешением 10 мкм. В предшествующих системах исследования и измерения проводились на длине волны 1,05 мкм [IIN – 2013, № 11, С. 6].

Компания Xenics (Бельгия) встроила линейные InGaAs-ФПУ в высокоскоростную сканирующую камеру компании Lync. Линейка из 2048 пикселей может осуществлять сканирование с частотой до 40 кГц. Производятся также камеры с линейными ФПУ, состоящими из 512 пикселей размерами 25 мкм и 1024 пикселей размерами 12,5 мкм. Эти камеры предназначены для оптической когерентной томографии и систем машинного зрения [IIN – 2013, № 11, С. 6].

Газоанализаторы. Компания Chemring Detection Systems (США) получила заказ на создание более чем 100 ИК датчиков для обнаружения на удалении в атмосфере до 5 км облачных химических, радиационных и биологических образований естественного или искусственного происхождения. Датчики будут обнаруживать их в пассивном режиме в спектральном диапазоне 7–14 мкм [IIN – 2013, № 3, С. 16].

Для обнаружения и определения состава и концентрации различных газов рядом фирм разрабатываются газоанализаторы на базе ИК интерферометров Фабри–Перо. Так, фирма Denso (Япония) разработала такой интерферометр, работающий в MWIR-диапазоне и служащий для обнаружения газов C₂H₅OH, CO₂, CO, CH₄ и др. [IIN – 2012, № 9, С. 1].

Газы и токсические химические вещества обнаруживаются с помощью двухдиапазонной (видимый и длинноволновый ИК каналы) камеры, разработанной фирмой Mine Safety Appliances США. В ИК

канале используется МБ-ФПУ компании FLIRS 640×480/17. Стоимость камеры составляет 60–80 тыс. \$ [ИИ – 2012, № 5, С. 1].

Компания Telops (Канада) предлагает ТВС Hyper-Cam для обнаружения и идентификации газов, а также для их визуализации в реальном масштабе времени, в которой применен ИК Фурье-спектрометр высокого разрешения с матричным МБ-ФПУ формата 320×256. Стоимость прибора – около 500 тыс. \$ [ИИ – 2012, № 8, С. 5].

Гиперспектральная система визуализации, основанная на Фурье-спектрометре, в котором применено КРТ-ФПУ формата 256×256, чувствительное в спектральном диапазоне 7–11 мкм, разработана фирмой ВО (США). Система имеет спектральное разрешение $0,7^{-1}$ см и обнаруживает ряд газов на расстояниях до 10 км [ИИ – 2012, № 5, С. 5].

Компания TCL (Япония) применила волоконно-оптический кабель, лазерную подсветку на длине волн 9,5 мкм и термопару для создания ТВС обнаружения паров алкоголя (этанола) у водителей автотранспорта [ИИ – 2012, № 9, С. 1].

Радиометрия, пирометрия и термография. Японское агентство по обороне (Japan Defense Agency) проводило с помощью ИК термографов измерения температур на АЭС «Фукусима» [ИИ – 2012, № 9, С. 7]. Для измерения температур в диапазоне 700°C–1800 °C компания Optis GmbH (Германия) предлагает пирометр, работающий без охлаждения ФПУ в спектральном диапазоне 0–1,1 мкм [ИИ – 2012, № 2, С. 4].

Новые ИК термометры (62 Max), разработанные компанией Fluke (США), по цене (около 100 \$) близки к существующим приборам. Они имеют водо- и пылезащищенную конструкцию и могут измерять температуры от 30°C до 500°C или от 30°C до 600°C с погрешностью $\pm 1,5\%$ на расстояниях, в 10–12 раз превышающих размер контролируемого участка [ИИ – 2012, № 6, С. 7].

Термографическая камера R300, построенная на базе МБ 320×240/23,5, предлагается компанией NEC Avio Infrared (Япония). ЭШПТ камеры – менее 3 мК. Она может применяться для измерения температур до 500°C (или до 2000°C) с погрешностями от $1^\circ\text{C}\pm 1\%$ до $2^\circ\text{C}\pm 2\%$. Камера имеет объектив переменного увеличения (зум-объектив), а также панорамную систему обзора [ИИ – 2012, № 3, С. 12].

Продолжают развиваться ТВС для обнаружения очагов пожаров и контроля распространения возгораний. Требования к пространственному разрешению таких систем повышаются: сегодня нужны системы с разрешением очагов возгораний на местности порядка нескольких сантиметров, а погрешность определения их координат не должна превышать 10 м. Предполагается, что такие системы должны быть двухдиапазонными (MWIR- и LWIR-диапазоны) [2; ИИ – 2013, № 3, С. 8].

Заключение

Несмотря на небольшой спад производства в 2012 г., развитие тепловизионных систем различного назначения неуклонно продолжается. Ожидается, что к 2017 г. рынок продаж тепловизионных систем вырастет на 11%. Растет число областей применения тепловизионных систем, заметно улучшается их пространственное, энергетическое и временное разрешение. Ведущие компании-разработчики тепловизионных систем наибольшее внимание уделяют двухдиапазонным тепловизионным системам с матричными фотоприемными устройствами, работающим в двух диапазонах ИК спектра.

Литература

1. Якушенков Ю.Г. Международные форумы «Оптические приборы и технологии – OPTICS-EXPO» // Фотоника. – 2012. – № 4 (34). – С. 30–33.
2. Тарасов В.В., Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы 3-го поколения. – М.: Логос, 2011. – 240 с.
3. Якушенков Ю.Г. Тенденции развития малогабаритных инфракрасных систем 3-го поколения, работающих активно-пассивным методом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 3 (79). – С. 11–14.
4. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Тенденции совершенствования элементной базы инфракрасных систем 3-го поколения // Изв. вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55. – № 5. – С. 56–63.
5. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. – М.: Университетская книга; Логос, 2007. – 192 с.
6. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
7. Horn S., Norton P., Cincotta T. et al. Challenges for third-generation cooled imagers // SPIE Proc. – 2003. – V. 5074. – P. 44–51.
8. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. – М.: Логос, 2011. – 568 с.

9. Bjork C., Wan W. Mid-wave infrared (MWIR) panoramic sensor for various applications // SPIE Proc. – 2010. – V. 7660. – P. 76600B-1...9.
10. Nichols J.M., Waterman J.R. Performance characteristics of a submarine panoramic infrared sensor // SPIE Proc. – 2010. – V. 7660. – P. 766005-1...9.
11. Fontanella J.-C., Delacourt D., Klein Y. ARTEMIS: first naval staring IRST in service // SPIE Proc. – 2010. – V. 7660. – P. 766006-1...11.
12. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Некоторые тенденции совершенствования оптико-электронных систем визуализации изображений 3-го поколения и их элементной базы (по материалам зарубежной печати) // Сб. Оптико-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений. – М.: ЦНИИ «Циклон», 2011. – Вып. 3. – С. 66–89.
13. Abbott P., Pillans L., Knowles P., McEwen R.K. Advances in dual-band IRFPAs made from HgCdTe grown by MOVPE // SPIE Proc. – 2010. – V. 7660. – P. 766035-1...11.
14. Melkonian L., Bangs J., Elizondo L. et al. Performance of MWIR and SWIR HgCdTe-based focal plane arrays at high operating temperatures // SPIE Proc. – 2010. – V. 7660. – P. 76602W-1...11.
15. McKeag W., Veeder T., Wang J. et al. New development in HgCdTe APDS and LADAR receivers // SPIE Proc. – 2011. – V. 8012. – P. 801230-1...14.
16. de Borniol E., Castelen P., Guellec F. et al. A 320×256 HgCdTe avalanche photodiode focal plane array for passive and active 2D and 3D imaging // SPIE Proc. – 2011. – V. 8012. – P. 801232-1...7.
17. Breiter R., Wendler J., Lutz H. et al. High operating temperature IR-modules with reduced pitch for SWaP sensitive applications // SPIE Proc. – 2011. – V. 8012. – P. 80122V-1...14.
18. MacDougal M., Hood A., Geske J. et al. InGaAs focal plane arrays for low light level SWIR imaging // SPIE Proc. – 2011. – V. 8012. – P. 801221-1...10.
19. Dixon P., Hess C.D., Chuan L. et al. Dual-band technology on indium gallium arsenide focal plane arrays // SPIE Proc. – 2011. – V. 8012. – P. 80121V-1...7.
20. Mounier E. Technical and market trends for microbolometers for thermography and night vision // SPIE Proc. – 2011. – V. 8012. – P. 80121U-1...6.
21. Fritze J., Munzberg M. The new megapixel thermal imager family // SPIE Proc. – 2011. – V. 8012. – P. 801205-1...8.
22. Li C., Skidmore G.D., Han C.J. Uncooled VOx infrared sensor development and application // SPIE Proc. – 2011. – V. 8012. – P. 80121N-1...8.
23. Ohnakado T., Ueno M., Ohta Y. et al. Novel readout circuit architecture realizing TEC-less operation for SOI diode uncooled IRFPA // SPIE Proc. – 2009. – V. 7298. – P. 7298OV-1...10.
24. Vergara G., Linazes-Herrero R., Gutierrez-Alvarez et al. VDP PbSe technology fills the existing gap in uncooled, low-cost and fast IR imagers // SPIE Proc. – 2011. – V. 8012. – P. 80121Q-1...11.
25. Военно-промышленный курьер. – 2013. – № 3 (471). – С. 12.
26. Linares-Herrero R., Archilla-Prat V., Montojo-Supervielle M.T. et al. High-speed IR monitoring of a turbojet engine gas flow using an uncooled MWIR imaging sensor // SPIE Proc. – 2011. – V. 8013. – P. 8013OP-1...13.
27. Santa Cruz G.A., Gonzalez S.R., Dagrosa A. et al. Dynamic infrared imaging for biological and medical applications in boron neutron capture therapy // SPIE Proc. – 2011. – V. 8013. – P. 8013O7-1...18.
28. Kauppinen T., Siikanen S. Improvement of energy efficiency – the use of thermography and airtightness test in verification of thermal performance of school buildings // SPIE Proc. – 2011. – V. 8013. – P. 8013O9-1...8.
29. Naranjo E., Baliga S., Park J. et al. IR gas cloud imaging in oil and gas applications: immunity to false stimuli // SPIE Proc. – 2011. – V. 8013. – P. 8013OB-1...10.
30. Bison P., Marinetti S., Cuogo G. et al. Corrosion detection on pipelines by IR thermography // SPIE Proc. – 2011. – V. 8013. – P. 8013OF-1...10.
31. Vela B.M., Hsien S.-J., Palomares J.B.D.G. Comparative analysis of pulse and active thermography for investigating solder joint geometry prediction // SPIE Proc. – 2011. – V. 8013. – P. 8013OH-1...20.
32. Tarin M. Pulse and lock-in IR NDT in complex structures // SPIE Proc. – 2011. – V. 8013. – P. 801312-1...12.
33. Alicandro C.J., DeMarco R.W. 1024x768 XGA Uncooled Camera Core achieves new levels of performance in a small package // SPIE Proc. – 2011. – V. 8012. – P. 80121H-1...6.
34. Cramer K.E., Winfree P. Fixed Eigenvector Analysis of Thermographic NDE Data // SPIE Proc. – 2011. – V. 8013. – P. 8013OT-1...11.
35. Koulas C.E. Extracting wildfire characteristics using hyperspectral, LiDAR and thermal IR remote sensing systems // SPIE Proc. – 2009. – V. 7298. – P. 72983Q-1...11.
36. Mouroulis P. Compact infrared spectrometers // SPIE Proc. – 2009. – V. 7298. – P. 729803-1...10.

Перечень некоторых сокращений и аббревиатур, используемых в настоящем обзоре

- **Издания:** IIN – Infrared Imaging News, SPIE Proc. – SPIE Proceedings.
- **Организации:** AFRL/RW – Air Force Research Laboratory, Munitions Directorate (США); DARPA – Defense Research Projects Agency (США); KRIS – Korea Research Institute of Standarts & Science; MDA – Missile Defense Agency (США); NVESD – Night Vision & Electronic Sensors Directorate (США).
- **Компании:** AV – AeroViroment Inc. (США); BO – Bruker Optics (США); DRST – DRS Technologies (США); FLIRS – FLIR Systems (США); IRC – IRCamera (США); JPL – Jet Propulsion Lab. (США); LMSBF – Lockheed Martin Santa Barbara Focalplane (США); LPT – LightPath Technologies (США); L3-CE – L-3 Cincinnati Electronics (США); MT – Mikro-Tasarim (Турция); NS – Nova Sensors (США); NU – Northwestern University (США); OOS – Optimum Optical Systems (США); RM – Reinmetall (Германия); RVS – Raytheon Vision Systems (США); SG – Selex Galileo Великобритания); SBC (Spectrolab, a Boeing Company (США); TCL – Toyota Central R&D Labs (Япония); TRT – Thales Research & Technology (Франция); TSB – Toshiba (Япония); Ul – Ulis (Франция); UM – Umicore (США).

- Тарасов Виктор Васильевич** – Московский государственный университет геодезии и картографии, доктор технических наук, профессор; ОАО «ЦНИИ «Циклон», генеральный директор, cyclone@asvt.ru
- Якушников Юрий Григорьевич** – Московский государственный университет геодезии и картографии, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, yakush@miigaik.ru