

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;

- *воспринимающие собственное излучение тел с различной температурой* — ИК-тепловизионные системы, работающие в коротком, среднем и дальнем ИК-диапазонах (1—3, 3—5, 8—14 мкм, соответственно), представляющие большой интерес и являющиеся предметом многочисленных исследований и разработок.

### Современное состояние фотоэлектроники

Рассмотрим в отдельности каждую группу приборов.

Первая группа приборов не относится к ИК-системам, так как ПЗС-камеры не могут использоваться для визуализации теплового и ночного изображения. Получение кремниевых матриц формата 4К×4К и даже 8К×8К (фирма Raytheon Vision System — RVS) показывает высокие потенциальные возможности кремниевой электроники для получения и обработки видеоизображения.

Приборы ночного видения на ЭОП не утратили своей роли как относительно дешевые и эффективные и дающие при естественном ночном освещении качественное изображение объектов на расстоянии 500—600 м (цель — типа человек) и 1—1,5 км (цель — типа танк). Изображение, даваемое ПНВ, хорошо воспринимается зрительным аппаратом человека, так как подобно дневному изображению воспроизводит освещенную картину, дающую после обработки в мозгу человека квази-объемное изображение.

Ночные прицелы на ЭОП для легкого стрелкового оружия, обычные и уплощенные очки ночного видения продолжают состоять на вооружении многих стран мира, и не наблюдается тенденции к свертыванию их производства. Комплексование ПНВ на ЭОП с ПЗС-камерами расширяет возможности этих приборов, позволяя "развязать" прибор и дисплей и передавать получаемое изображение на расстояния, зависящие только от мощности видеопередатчика. В случае успеха в получении хорошей спектральной чувствительности в ЭОП 3-го поколения в области максимума излучения ночного неба (1,6 мкм) приборы ночного видения на таких ЭОП получают дополнительные преимущества и смогут использоваться практически в течение всей ночи на любых широтах.

В тепловидении наиболее широко используемым полупроводниковым материалом для ИК-матриц продолжает оставаться теллурид кадмия-ртути (КРТ) из-за своих уникальных характеристик и высокой чувствительности в областях ИК-спектра от 1 до 12 мкм. Однако сложности технологии и высокая цена материала ограничивают использование КРТ в гражданском секторе [1].

Качество матриц из антимонида индия (InSb) быстро растет в течение последних 5—10 лет, и сейчас такие фокальные матрицы являются основными для большинства бортовых систем, работающих в среднем ИК-диапазоне. ИК-фотоприемники на квантовых ямах (QWIP's — Quantum Well Infrared Photodetectors) пока уступают в квантовой эффективности приемникам на КРТ и InSb. Ожидается, что QWIP's будут продолжать развиваться для общих военных применений [2].

Применение фокальных матриц на силициде платины (PtSi) в военных системах резко упало из-за невозможности конкуренции с имеющими более высокие характеристики InSb-матрицами.

Неохлаждаемые резистивные микроболометры на двуокиси ванадия ( $VO_x$ ) нашли применение в ряде программ по созданию военных систем, включая тепловизионные прицелы, улучшенные средства вождения и др. Микроболометры планируется использовать также в будущих системах вооружения солдата как в США, так и в Европе, что предполагает значительный рост объемов их производства и снижение себестоимости.

Фокальные матрицы на материале InGaAs получили широкое развитие в течение последних пяти лет. Работы по совершенствованию технологии их производства активно ведутся многими ведущими фирмами, и результаты этих работ имеют существенное значение для дальнейшего развития неохлаждаемых ИК-фотоприемников и ФУ в области спектра 1—3 мкм.

В последние годы ведутся новые исследования в области создания матричных фотоприемников на солях свинца, разрабатываются новые технологии неохлаждаемых матричных приемников теплового излучения, но эти работы не столь обширны, как по основным материалам ИК-техники.

- Безусловным лидером в области разработки и производства современных приемников ИК-техники является американская фирма Raytheon. Она является также лидером по достигнутому уровню разработок и объему продаж сканируемых и смотрящих ИК-матриц 2-го поколения на основе КРТ (более 60 % мирового рынка), по высококачественным  $VO_x$ -микроболометрам для престижных программ вооружения и одним из лидеров по смотрящим матрицам и модулям на материале InSb (~ 28 %), занимающая ~ 31 % рынка.

- За ней следует фирма США DRS Technologies — по производству и продажам охлаждаемых (~ 10 % рынка смотрящих ИК-матриц 2-го поколения) и неохлаждаемых матриц (лидер в области неохлаждаемых  $VO_x$ -микроболометрических матриц и модулей).

- Французские фирмы Sofradir (~ 17 % рынка охлаждаемых матриц 2-го поколения) и Ulis (не-

охлаждаемые микроболлометры) вместе имеют ~ 9 % мирового рынка (на начало 2008 г. подготовлена производственно-технологическая база по выпуску приемников 3-го поколения).

- Израильская компания SCD (ведущий разработчик и поставщик смотрящих матриц и модулей на материале InSb — ~ 43 %) также имеет ~ 9 % рынка.

- BAE Systems (VO<sub>x</sub>-микроболлометры) после продажи отделения авионики в Великобритании (ферроэлектрические матрицы) Selex имеет чуть менее 8 % рынка.

- Немецкая компания Aim в основном обслуживает внутренний рынок, но имеет заметный экспорт в США и другие страны. Rockwell Scientific специализируется на высококачественных фокальных матрицах КРТ.

- Американская фирма L-3 вышла в число заметных производителей ИК-приемников и стала одним из ведущих поставщиков неохлаждаемых матриц после приобретения Raytheon Commercial Infrared (неохлаждаемые ферроэлектрические матрицы и микроболлометрические модули) и ИТС (неохлаждаемые VO<sub>x</sub>-микроболлометры).

- Cincinnati Electronics выпускает матрицы, модули и камеры на базе InSb.

- Indigo/FLIR поставляет как охлаждаемые (один из основных разработчиков и поставщиков смотрящих матриц на материале InSb), так и неохлаждаемые (VO<sub>x</sub>-микроболлометры и InGaAs) матрицы и модули.

- Lockheed Martin's Santa Barbara Focalplane поставляет матрицы InSb компании-учредителю, а также выступает как оптовый поставщик.

- В Китае основными разработчиками и поставщиками являются Kunming Institute of Physics, Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences и Northwest China Research Institute.

- Другими заметными поставщиками являются: Goodrich/Sensors Unlimited (ведущий поставщик неохлаждаемых матриц и камер на основе InGaAs), Qwiptech, Thales RT и Acreo (QWIP's), Mitsubishi Electric (PtSi- и неохлаждаемые матрицы), Fujitsu (КРТ- и QWIP's-матрицы), NEC (VO<sub>x</sub>-микроболлометры по лицензии Honeywell), INO (VO<sub>x</sub>-микроболлометры), NEC (I) Mitsubishi Electric (микроболлометры SOI — кремний на изоляторе), Textron Systems (дискретные приемники PbS и PbSe), Judson (отдельные детекторы и малоформатные матрицы), Sagem (1-е поколение приемников на КРТ и небольшое количество матриц на материале InSb).

- Основными производителями ИК-приемников в России являются ФГУП «НПО "Орион"»,

ОАО «Московский завод "Сапфир"», ФГУП "Альфа", ФГУП «НИИ "Полус" им. И. М. Стельмаха».

### Перспективы фотоэлектроники

Основные направления развития ИК-фотоэлектроники на ближайшую перспективу за рубежом следующие:

- Ближайшим шагом являются разработка и освоение в промышленности тепловизионных систем и тепловизоров 3-го поколения, основное отличие которых — фокальные матрицы, способные работать одновременно в нескольких ИК-диапазонах; завершение этого этапа следует ожидать не ранее 2009—2010 гг.

- Основными материалами для матриц 3-го поколения будут оставаться КРТ и InSb. Создание успешно работающих приборов на квантоворазмерных эффектах с использованием последних достижений в области нанотехнологий на перспективных материалах (GaAs—AlAs, углеродные нанотрубки и др.) могут открыть путь к созданию многоспектральных приемников, в том числе с перестраиваемыми границами спектральных диапазонов [3].

- Важным фактором, ускоряющим разработки как охлаждаемых, так и неохлаждаемых военных ИК-технологий являются программы "Вооружение солдата будущего" и "Нейросетевые системы", разрабатываемые в США, Европе и Израиле. Выполнение этих программ должно кардинально изменить характер боевых операций в XXI веке.

- Продолжающееся развитие рынка ИК-систем двойного назначения также способствует более быстрому развитию неохлаждаемой ИК-фотоэлектроники вследствие взаимного использования технологий и комплектующих изделий.

### Базовые модули формирования тепловизионного видеосигнала

В последние годы следует отметить заметный рост выпуска базовых модулей формирования тепловизионного видеосигнала (МФТВ), содержащих, кроме фоточувствительной матрицы и системы охлаждения, схемы обработки сигнала и формирователя стандартного видеосигнала. Часть модулей выпускается с ИК-объективами.

Модули формирования тепловизионного видеосигнала относятся к ключевым технологиям оптико-электронных систем военной техники. Среди разрабатываемых и производимых базовых модулей можно выделить следующие:

**Controp Fox-450Z/ Controp Fox-450ZE** (Controp Precision Technologies Ltd, Израиль) — модули с

zoom-объективом, управляемым с внешней панели или через канал связи RS-422. В модулях используется фокальная матрица InSb 3-го поколения формата 320×256 пикселей MWIR-диапазона (3—5 мкм);

**DRS SE-U20** (DRS Electro-Optical Systems, США) — неохлаждаемый ИК-модуль на основе серии неохлаждаемых  $VO_x$  болометрических матриц U3000 формата 320×240 пикселей, обладающий высокими характеристиками, что дает возможность применять его как в военных, так и гражданских системах;

**Apache** (FLIR Systems-Indigo Division, США) — тепловизионный модуль на основе смотрящей фокальной матрицы InSb форматом 640×512 пикселей, находящейся в цельнометаллическом отпаянном дьюаре, который интегрирован с холодильником системы Сплит Стирлинг — спектральный диапазон чувствительности 3—5 мкм (1—5 мкм по заказу);

**LIRC** (производство FLIR Systems) — компактный модуль на основе фотоприемной матрицы на квантовых ямах форматом 640×480 элементов со спектральной чувствительностью в LWIR-диапазоне (8—12 мкм) с микрохолодильником Стирлинга вращательного типа — спектральный диапазон чувствительности 7,5—9,3 мкм;

**Phoenix** — тепловизионный модуль производства FLIR Systems в варианте комплектующего изделия (ОЕМ). Этот вариант наиболее подходящий для шарнирных применений в военных системах. Создан на базе фокальной матрицы InSb форматом 640×512, находящейся в цельнометаллическом отпаянном дьюаре, который интегрирован с линейным холодильником системы Сплит Стирлинг — спектральный диапазон чувствительности 3—5 мкм (1—5 мкм по заказу);

**Thermo Vision ® 6-24 UC II** (FLIR Systems) — неохлаждаемый модуль на основе микроболометрической матрицы формата 320×240 пикселей, обеспечивающий надежный и быстрый запуск по сравнению с охлаждаемыми ИК-системами;

**Трехпольный тепловизионный QWIP's-модуль** (FLIR Systems, США) — модуль на основе 3-го поколения QWIP's фокальных матриц с чувствительностью в спектральном диапазоне 8—9 мкм. Электроника и оптика модуля рассчитаны на использование QWIP's-матриц на основе GaAs форматом до 640×480 пикселей. Три поля зрения дают возможность работы в разных режимах — от общего обзора и разведки до обнаружений целей на больших (свыше 10 км) расстояниях;

**Falcon** (Semi Conductor Devices, Израиль) — интегрированный с системой охлаждения (IDCA) модуль на основе матрицы InSb формата 640×512 пикселей, предназначенный для решения самых сложных проблем применения тепловидения;

**Gemini** (Semi Conductor Devices, Израиль) — первая матрица фирмы SCD на основе InSb формата 320×256 элементов, изготовленная в количестве нескольких тысяч и нашедшая всемирное признание как матрица высокого класса для морских, наземных и воздушных применений — спектральный диапазон чувствительности 1—5,5 мкм.

В качестве примера приведено лишь небольшое число базовых модулей, но количество таких изделий с каждым днем быстро растет.

### Технологические задачи

Одним из основных факторов повышения характеристик фокальных матриц является разработка технологий изготовления высококачественного полупроводникового материала. В настоящее время встала задача получения эпитаксиальных слоев KPT и InSb большой площади (диаметром не менее 150 мм) с электрофизическими параметрами, не уступающими объемным монокристаллам и удовлетворяющим требованиям по высокому структурному совершенству и однородности фотоэлектрических характеристик по всей площади. Увеличение размеров эпитаксиальных слоев позволит повысить объемы выпуска МФПУ, получаемых из одной пластины, и тем самым снизить стоимость прибора.

Выращивание эпитаксиальных и гетероэпитаксиальных структур на альтернативных подложках (GaAs, Si, Ge, GaP, InP, GaSb,  $Al_2O_3$ , InSb, CdZnTe и др.) — важнейшая задача в области совершенствования полупроводниковых материалов для ИК-техники.

Использование альтернативных подложек снижает стоимость фоточувствительных материалов, в первую очередь это относится к KPT, особенно при массовом производстве ИК МФПУ. Об этом убедительно свидетельствуют полученные рядом фирм результаты (Raytheon, Sofradir, DRS Technologies, BAE Systems, L3 Communication).

Решение этой задачи возможно при использовании молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), которая является наиболее гибкой и сложной технологией. Она превосходит другие эпитаксиальные методы выращивания слоев (жидкофазная эпитаксия, эпитаксия из металлоорганических соединений) на альтернативных подложках в первую очередь из-за низких температур роста (порядка 180 °C), что уменьшает возможность диффузии примесей из подложки и снижает фоновое легирование примесями. Кроме того, технология МЛЭ имеет лучшую возможность использования аналитических методов для контроля как технологических параметров, так и характеристик слоев в процессе их роста.

### ИК-фокальные матрицы

Получение качественных исходных материалов делает возможным создание более совершенных ИК-фокальных матриц. В первую очередь речь идет о лавинных фотодиодах (ЛФД), которые могут обеспечить усиление в 100—1000 раз по сравнению с обычными фотодиодами при сохранении неизменным отношения сигнал/шум. Это достигается созданием так называемых "иницированных одним электроном" ЛФД, в которых в процессе размножения также доминируют электроны. Работы в этом направлении интенсивно ведутся фирмами DRS Technologies (США) и совместно Sofradir и CEA-Leti (Франция) [4].

Матрицы с ЛФД-пикселями могут использоваться для получения трехмерных изображений. Для этого объект облучается лазерным импульсом с длиной волны, безопасной для человеческого зрения. Пиксели матрицы приемников применяются для получения изображения объекта и информации о расстоянии до него в пределах времени кадра изображения. Так как отраженный сигнал очень мал, для его усиления можно использовать пиксели с ЛФД и широкую полосу частот. 3-D-датчики дают многократное преимущество по дальности идентификации по сравнению с системами типа FLIR. В направлении создания датчиков с пикселями, использующими ЛФД для усиления очень слабого отраженного сигнала, также развернули работы фирмы США (Raytheon, Lockheed Martin Missiles, Rockwell Scientific). Фирма Raytheon уже получила методом МЛЭ матрицу формата 256×256 с ЛФД на основе КРТ с рабочей длиной волны 1,5 мкм. Убедительные практические результаты и теоретическое обоснование дали хорошие предпосылки для развертывания работ по созданию моноимпульсных ИК-систем.

Важным направлением ИК-фотоэлектроники является создание "умных" (интеллектуальных) фокальных матриц, которые не только обнаруживают ИК-излучение объекта, но и выполняют функции, для которых обычно применялись дополнительные модули. Примерами характерных признаков "умных" матриц являются:

*изменяемый мультиплексируемый участок матрицы*, что особенно важно для решения задач захвата и сопровождения. Начальный этап — захват — требует большого числа пикселей, в то время как сопровождение — гораздо меньшего числа пикселей, но с большей частотой кадров;

*автоматическая синхронизация;*

*многоспектральность*, существенно повышающая возможности систем в части идентификации объектов.

Большие надежды для промышленной реализации умных матриц дают работы по созданию гете-

роэпитаксиальных структур  $A^{II}B^{VI}$ ,  $A^{III}B^V$  на кремниевых подложках больших диаметров (более 150 мм) с малым числом дефектов (менее 100 см<sup>-1</sup>).

К настоящему времени достаточно хорошо изучена микроструктура кремниевых поверхностей в качестве подложек для создания сенсоров, детекторов и фотоэлектрических устройств. На ряде фирм США организовано производство матричных фотоприемников, в том числе многоспектральных, на подложках кремния диаметром 150 мм с высоким процентом пикселей, удовлетворяющих заданным требованиям (более 95 %), что дает возможность создания ИК-приемников с числом элементов до 40—50 мегапикселей на пластину.

В рамках программы "Матрицы с вертикальным соединением детекторов" фирмами Raytheon, DRS Infrared Technologies, Rockwell Scientific ведутся разработки *трехмерной конфигурации считывающей электроники* для "умных" фокальных матриц. Разработки направлены на создание конфигурации плотного массива параллельных межсоединений. В результате реализации программы ожидается получение матрицы с высоким коэффициентом заполнения, широким динамическим диапазоном, многоспектральностью, высоким качеством изображения и очень высоким быстродействием. Ожидается, что "умные" матрицы станут неотъемлемой частью фокальных матриц 3-го поколения.

В последние годы интенсивно ведутся разработки двухцветных (двухдиапазонных) матричных приемников ИК-излучения. В большинстве случаев разделение на отдельные спектральные каналы осуществляется "по глубине" (а не по площади) фоточувствительного элемента. Каждый пиксель такой матрицы представляет многослойную полупроводниковую структуру, отдельные слои которой поглощают излучение в различных спектральных диапазонах. Такая структура может быть изготовлена на основе КРТ с различным составом. Прошедшее через подложку излучение сначала поглощается в коротковолновом КРТ-фотодиоде (3—5 мкм), а после прохождения промежуточного оптического контактного слоя — в длинноволновом КРТ-фотодиоде (6—10 мкм). Схема считывания может работать в режиме одновременного или последовательного считывания сигналов [5].

Об исследовании первых двухцветных матриц сообщалось в 2001 г. Американская фирма DRS Infrared Technologies в этот период разработала два типа двухцветных матриц форматом 320×240 и размером пикселя 50 мкм на базе слоев КРТ. Одна из двухцветных матриц работала в спектральных полосах 3,0—5,2 и 8,0—10,2 мкм и имела эквивалентную шуму разность температур  $\Delta T$ , равную 9 и 23 мК, соответственно.

Для КРТ-матрицы на диапазоны 3,0—4,2 и 4,2—5,2 мкм эти значения составили 18,1 и 8,3 мК, соответственно. Позднее DRS Infrared Technologies разработала для двухцветных матриц новую технологию соединения матрицы со схемой считывания (HDVIP™), исключая применение для этой цели индиевых микроконтактов. Технология позволила осуществить одновременный съем сигналов с коротко- и длинноволновых матриц фотодиодов формата 320×240 с помощью схемы считывания формата 640×480 при одинаковом времени накопления для всех пикселей.

### Мультиспектральные системы

Перекрытие спектральных характеристик каналов двухдиапазонных КРТ-матриц создает серьезные трудности с разделением сигналов от каждого канала. Лучшие характеристики двухцветных фотоприемников могут получиться на матрицах с квантовыми ямами, так как узкие спектральные характеристики последних исключают перекрытие этих характеристик.

Для создания эффективной аэрокосмической разведки и экологического мониторинга требуются разработка и совершенствование мультиспектральных систем на основе тепловизионных систем 3-го поколения. Разложенные по спектру (по длинам волн) световые потоки, приходящие от элементов наблюдаемой сцены, проецируются вдоль столбцов многоэлементной фокальной матрицы. Отдельные изображения, соответствующие определенной длине волны, трансформируются в сигналы, амплитуды которых соответствуют интенсивности отдельных спектральных составляющих. Сканируя сцену в направлении столбцов, можно получить распределение спектральных плотностей яркости по полю обзора. Вместе с сигналами, соответствующими яркости вдоль строк, получается трехмерное изображение наблюдаемой сцены в координатах  $x$ ,  $y$ ,  $\lambda$ . Мультиспектральные системы позволяют не только обнаружить неразличимые в обычных тепловизорах объекты и образования, но и в разы лучше их идентифицировать.

Задачи по увеличению дальности обнаружения и идентификации наблюдаемых в тепловизор объектов привели к фовеальному принципу наблюдения, при котором на матрице создается участок (окно) с повышенным разрешением (аналогично человеческому глазу) за счет времени накопления или уменьшения размеров пикселей с возможностью нескольких комбинаций строк и столбцов. Первые окна появились на матрицах и тепловизорах 2-го поколения, а для тепловизоров 3-го поко-

ления фовеальная область является практически обязательной.

Появление этих областей (окон) в свою очередь потребовало совершенствования мультиплексоров. Сделаны большие успехи в создании мультиплексоров 3-го поколения, чипов АЦП, двух- или трехцветной одновременной интеграции и в получении высокой скорости кадров. Были также созданы алгоритмы обработки изображения, реализованные в видеопроцессорах, в том числе на основе нейропроцессоров, широко используемых в типовых тепловизионных модулях.

### Генераторы холода

Важной частью фотоэлектронных модулей является система генерации холода, обеспечивающая охлаждение фоточувствительных структур до рабочей температуры и во многом определяющая эксплуатационные характеристики изделия. Решение задачи создания высокочувствительных тепловизионных систем тесно связано с решением проблем по созданию и организации производства генераторов холода различной холодопроизводительности с ресурсом работы не менее 10 000 ч и малым потреблением мощности. Решение задачи создания систем охлаждения с рабочим ресурсом до 40 000 ч реально в ближайшей перспективе, что подтверждается результатами проведенных практических исследований. В данной области получены хорошие результаты, и ряд фирм США (Litton, Raytheon), Франции (Thales, Cryotechnologies), Израиля (Ricor), Германии (AIM) успешно реализовали на практике результаты исследований, выполненных в последние годы как в части создания специальных конструкционных материалов, так и разработки технологичной оптимальной конструкции холодильных машин. К 2008 г. большинство производителей достигло высоких технических показателей микрокриогенных систем:

время выхода на стационарный режим сокращено до 2,5—5 мин (Raytheon, Thales, Ricor);

хладопроизводительность в стационарном режиме достигла 13—14 % от потребляемой мощности (интегральные ротационные МКС фирм Thales и Ricor);

удельная масса МКС снижена до 850—900 г на 1 Вт хладопроизводительности.

### Выводы

Продолжается рост мирового рынка тепловизионной техники и, как следствие, числа разработок новых фотоприемников и фотоприемных уст-

роиств ИК-диапазона. Наиболее широкоиспользуемым полупроводниковым материалом для ИК-матриц продолжает оставаться КРТ. Качество матриц из антимонида индия быстро растет, и сейчас такие фокальные матрицы являются основными для большинства бортовых систем, работающих в среднем ИК-диапазоне. QWIP's пока уступают в квантовой эффективности приемникам на КРТ и InSb, но быстро развиваются. Применение фокальных матриц на силициде платины (PtSi) в военных системах резко упало из-за невозможности конкуренции с имеющими более высокие характеристики InSb-матрицами. Неохлаждаемые резистивные  $VO_x$ -микроболометры нашли применение в приоритетных программах по созданию различных систем, включая тепловизионные прицелы, улучшенные средства вождения, наблюдательные приборы. Число разработок и объемы производства неохлаждаемых матричных приемников растут опережающими темпами.

Ведутся интенсивные разработки фокальных матриц на основе InGaAs, результаты которых важны для дальнейшего развития неохлаждаемых ИК-фотоприемников и ФПУ ближнего ИК-диапазона, способных заменить традиционные приборы ночного видения.

В последние годы ведутся новые разработки в области создания матричных фотоприемников на солях свинца.

Следующим важным шагом являются разработка и освоение в промышленности фокальных матриц, способных работать в нескольких ИК-диапазонах. Основными материалами для матриц 3-го поколения остаются теллурид кадмия-ртути и антимонид индия, но следует ожидать роста конкурирующих матриц на основе квантоворазмерных структур, в том числе с перестраиваемыми границами спектральных диапазонов.

Дальнейшее развитие разработок матричных приемников будет происходить в направлении увеличения числа пикселей до  $1280 \times 720$  (стандарт HDTV),  $1280 \times 1024$ ,  $1920 \times 1080$  (Full HD), уменьшения размеров фоточувствительной площадки и шага пикселей матрицы, создания двухцветных/двухспектральных матриц, увеличения кадровой частоты. В ФПУ будет широко интегрироваться цифровая обработка (цифровые схемы считывания и мультиплексирования), большое внимание будет уделено разработке новых архитектур мультиплексоров, поиску путей совмещения мультиплексора с традиционной технологией фотоприемника.

В технологии производства фотоприемников намечается широкое использование молекулярно-лучевой эпитаксии. Большое внимание в ближайшее время будет уделено совершенствованию материалов фоточувствительных слоев, использованию подложки из альтернативных материалов, причем размер их будет не менее 150 мм с тенденцией роста до 200 мм в целях использования высокопроизводительного оборудования, разработанного для кремниевой технологии.

Предусматривается рост выпуска базовых ИК-модулей формирования тепловизионного видеосигнала, содержащих, кроме фоточувствительной матрицы и системы охлаждения, схемы обработки сигнала и формирователя стандартного видеосигнала как законченных изделий. Часть модулей будет выпускаться с ИК-объективами.

Модули формирования тепловизионного видеосигнала уже отнесены к ключевым технологиям оптико-электронных систем военной техники, и их роль при построении ИК-приборов, систем и комплексов в дальнейшем будет только расти.

Развитие чувствительных элементов (как тепловизионных систем, так и приборов ночного видения) неминуемо приведет к их комплексированию в комбинированных приборах, так как тепловой канал обеспечивает улучшенное изображение, а канал на ЭОП — улучшенное распознавание и идентификацию. Поскольку по данным направлениям достигнуты значительные результаты, в том числе в области миниатюризации, создание массовых приборов, например комбинированных очков, — более чем реальная задача ближайшего будущего.

#### Л и т е р а т у р а

1. Бурлаков И. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М., Дегтярев Е. В. Фотоприемные устройства для тепловизионной аппаратуры второго поколения//Прикладная физика. 2007. № 2. С. 43—53.
2. Рогальский А. Инфракрасные детекторы: Пер. с англ./Под ред. А. В. Войцеховского. — Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 2003. — 636 с.
3. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотозлектроника. Физические основы. — М.: Физматкнига, 2003. — 384 с.
4. Tribolet P. Next-Generation Developments for Infrared Detectors//Europhotonics, 2008. V. 13. Issue 1. P. 26, 27.
5. Тарасов В. В., Якушников Ю. Г. Инфракрасные системы смотрящего типа. — М.: Логос, 2004. — 444 с.

Статья поступила в редакцию 9 октября 2008 г.

## Current state and outlook of IR photoelectronics development

*L. Ya. Grinchenko, V. P. Ponomarenko, A. M. Filachev*  
Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia.

*It was assayed state of creating and producing of infra red (IR) photodetectors and photodetector assemblies. Tendencities in the field of further evolution of semiconductor material science for IR photodetectors had been examined. It was considered possibility of broadening of photodetector assemblies' functionality and ways of development of this industry.*

PACS 85.60.Gz

УДК 621.382: 539.32

## Механизмы токопереноса фотодиодов на основе ГЭС КРТ МЛЭ для спектрального диапазона 8—12 мкм

*Ж. В. Гуменюк-Сычевская, В. В. Забудский, И. А. Лысюк, Ф. Ф. Сизов*  
Институт физики полупроводников НАН Украины, г. Киев, Украина

*В. В. Васильев, В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, Ю. Г. Сидоров*  
Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

*Проведены исследования механизмов токопереноса фотодиодов типа  $n^+n^-p$  и  $n^+p$ , полученных при ионном легировании бором гетероэпитаксиальных слоев (ГЭС) теллурида кадмия и ртути (КРТ)  $p$ -типа проводимости, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Результаты моделирования характеристик токопереноса при  $T = 77$  К показали, что темновой ток изготовленных фотодиодов типа  $n^+n^-p$  лимитируется диффузионным током в переходе и током через уровень ловушек донорного типа в запрещенной зоне с энергией  $E_t = 0,7 E_g$ .*

PACS: 72.80.Ey; 73.61.Ga

### Введение

Одной из фундаментальных физических характеристик инфракрасных (ИК) фотодиодов, которые применяются в многоэлементных (матричных или линейчатых) фотоприемных устройствах (ФПУ) с кремниевыми схемами считывания, являются процессы токопереноса через  $p$ - $n$ -переход (темновой ток), которые определяют дифференциальное сопротивление. Эти характеристики фотодиода при температурах эксплуатации (77 К) в длинноволновой области ИК-спектра 8—12 мкм должны быть согласованы с параметрами современных кремниевых схем считывания (КСС), имеющих сопротивление входных устройств для каждого из фотодиодов элементов более  $10^8$  Ом и заряд накопительных ячеек  $\sim 2 \cdot 10^7$  электронов (соответствует емкости 1 пКл). Время накопления сигнала будет определяться временем заполнения накопительных емкостей КСС током носителей заряда, генерированных фоновым потоком излу-

чения. Для спектральной области чувствительности 8—12 мкм и холодной диафрагмы ФПУ с диафрагменным числом  $F/2$  время накопления для фотодиодов на основе HgCdTe площадью  $25 \times 25$  мкм и величине накопительного заряда  $N \sim 2 \cdot 10^7 e^-$  составляют  $\tau \sim 20$  мкс при температуре фона 300 К.

Для реализации больших времен накопления сигнала необходимо обеспечить в фотодиодах условия переноса заряда только за счет диффузионного тока, определяющего предельные электрические характеристики. Существуют также дополнительные каналы протекания тока, которые снижают качество фотодиода.

Исследованию механизмов токопереноса при температуре  $T = 77$  К фотодиодов, полученных при ионном легировании бором ГЭС КРТ  $p$ -типа проводимости, выращенных методом МЛЭ, посвящена данная работа. Проведено измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) фотодиодов и сравнение полученных результатов с полученными данными при моделировании токопереноса