

УДК 621.383

Современное состояние и новые направления полупроводниковой ИК-фотоэлектроники (Часть 1^{*})

М. Д. Корнеева, В. П. Пономаренко, А. М. Филачёв

Рассмотрено современное состояние и научно-технологические предпосылки развития ряда базовых технологий инфракрасной фотоэлектроники: полупроводниковых фоточувствительных материалов, твердотельных фотопреобразователей для ИК-, УФ- и терагерцевой областей электромагнитного излучения, многоспектральных и быстродействующих приборов, метаматериалов и нанотехнологий для создания новых классов оптико-электронной аппаратуры. Представлены результаты создания ряда фотоприемных устройств, "смотрящих" и ВЗН-матриц из $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$, $InSb$, $InGaAs$, $GaPAs$, PbS , $PbSe$, Si и Ge для областей спектра 8—12, 3—5, 1—2 мкм с числом элементов 2×96 , 2×256 , 4×288 , $2 \times (2 \times 288)$, 6×576 , 128×128 , 256×256 , 320×256 , 384×288 и др., систем цифровой обработки и синтеза изображений, матричных формирователей тепловизионного видеосигнала на их основе.

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: фотоэлектроника, тепловидение, многоспектральный, кадмий—ртуть—теллур, антимонид индия, твердый раствор, халькогениды свинца, обнаружительная способность, матричный, быстродействующий, метаматериал, наноразмерный.

Введение

Инфракрасная фотоэлектроника вместе с фотоэлектроникой видимого диапазона по-прежнему остается одним из ключевых направлений современного оптического приборостроения. В 2010 г. в мире, по опубликованным данным, было выпущено порядка 65 тыс. фотоприемников и фотоприемных устройств. Из них на долю первого поколения приходится примерно 15 200 изделий. Остальные 49 800 изделий — приборы второго поколения. Из этого числа примерно 27 000 изготавливаются из КРТ и антимонида индия, 25 000 — на основе микроболометров. Неохлаждаемые микроболометрические матрицы уступают охлаждаемым матрицам из КРТ и антимонида индия по чувствительности и быстродействию,

однако за счет компактности, обусловленной отсутствием системы глубокого охлаждения, занимают значительную нишу применений в тепловизионной технике, где не требуется предельных характеристик по дальности обнаружения и распознавания. Это задачи обзора, вождения техники в ночное время, прицеливания на относительно небольших дистанциях, обнаружения нагретых объектов в завалах, контроля тепловых утечек и т. п. На долю приборов на основе квантоворазмерных эффектов (квантовые ямы, напряженные сверхрешетки 2-го рода и др.) приходится примерно 700—800 штук. Производство Шоттки-барьерных (PtSi) фокальных матриц, не выдержавших конкуренцию с матрицами из антимонида индия, во многих фирмах свернуто, хотя, по мнению авторов, их возможности еще далеко не исчерпаны. Объемы поставок неохлаждаемых ферроэлектрических матриц постепенно сокращаются, а их разработка приостанавливается. Вакуумные инфракрасные видиконы (фотопроводящие и пироэлектрические) в современной военной аппаратуре практически не используются.

В настоящее время в опто- и фотоэлектронике ясно наметился целый ряд направлений, связанных с усовершенствованием методов регистрации сверхслабых оптических сигналов, созданием быстродействующих и многоспектральных систем, 3D-изображений и др. Начинают реализовываться идеи использования метаматериалов и нанотехно-

^{*} Часть 2 — см. № 3, 2011 г.

Корнеева Марина Дамировна, первый зам. генерального директора¹.

Пономаренко Владимир Павлович, зам. генерального директора¹, профессор².

Филачёв Анатолий Михайлович, генеральный директор¹, профессор².

¹ФГУП «НПО "Орион"», ГНЦ РФ.

Россия, 111402, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. (499) 374-94-00. E-mail: orion@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, г. Долгопрудный МО, Институтский пер, 9.

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2010 г.

логий, осваиваться терагерцовый диапазон (ТГц-фотоэлектроника), гипер- и ультраспектральная селекция, что вместе с "традиционными" тепловидением и теплопеленгацией необычайно широко раздвигает границы и возможности оптико-электронного приборостроения.

В настоящей статье описано состояние и основные результаты, полученные в России в вышеперечисленных областях, и рассмотрены перспективы развития ряда технологий отечественной ИК-фотоэлектроники. К последним относятся следующие основные позиции.

1. Ультрафиолетовая твердотельная фотоэлектроника, направленная на разработку матричных "солнечно-слепых" и "видимо-слепых" ФПУ. Создание достаточно доступной МОС-гидридной технологии изготовления твердых растворов AlN—GaN, как *p*- так и *n*-типа проводимости, обеспечило разработку гибридных матриц форматов порядка 256×256 и 320×256 на основе этих соединений на различных подложках, в том числе со структурой *p-i-n* [1]. Такие матрицы по своим пороговым характеристикам ($D^* \geq 6 \cdot 10^{13}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹) становятся вполне конкурентоспособными по сравнению с фотоэлектронными умножителями и электронно-оптическими преобразователями, где используются фотокатоды из Cs₂Te и Rb₂Te. Обеспечивая четко наблюдаемое различие между корпусом ракеты и ее факелом на активном участке полета, УФ-аппаратура становится незаменимой при решении ряда задач ПРО, ПКО, ПВО и др.

2. Твердотельная фотоэлектроника на основе твердых растворов InAs—GaAs, InSb—GaSb и др. для области спектра 1—2 и 1—3 мкм. Матричные приемники 2-го поколения на основе этих соединений должны позволить создать твердотельные аналоги вакуумных электронно-оптических преобразователей со спектральной чувствительностью, "продвинутой" в область максимума светимости ночного неба ($\lambda_m \cong 1,8$ мкм). На основе матрицы формата 320×256 из InGaAs фирмы Sensors Unlimited, Inc. и Indigo Systems (США) уже создали [2] сверхминиатюрные ночные наблюдательные приборы.

3. Фотоэлектроника на основе матричных фотодиодов КРТ со структурой *p-n⁺-n* для тепловизионных систем, работающих в активно-импульсном режиме. Такие структуры благодаря лавинному усилению имеют существенно большую чувствительность по сравнению с *p-n⁺*-фотодиодами [3]. При этом они могут содержать не только сведения о спектральной яркости элементарного фрагмента изображения, но и информацию о расстоянии до него, что дает возможность построить объемное 3D-изображение наблюдаемого объекта.

4. Фотосенсорика терагерцового диапазона (ТГц-сенсорика), где происходит активный поиск

оптимальной элементной базы для построения фотоприемных устройств, необходимых при регистрации ЭМИ в диапазоне $\lambda \cong 30$ мкм — 3 мм ($\nu = 10^{11}$ — 10^{13} Гц). В этой области расположены характерные частоты колебаний фононов твердых тел и вращательно-колебательные моды тяжелых органических молекул, что открывает совершенно новые возможности дистанционного селективного зондирования, в том числе для обнаружения взрывчатых веществ, медицинской диагностики и пр. [4].

5. Современная микрофотоэлектроника ИК-диапазона уже сейчас в определенной степени базируется на использовании наноматериалов и нанотехнологий. Сюда в первую очередь относятся молекулярно-лучевые технологии получения наноразмерных гетероэпитаксиальных слоев узкозонных полупроводников, использование для построения ФПУ квантоворазмерных явлений и др. [5]. Исследуются возможности применения метаматериалов в оптике и фотоэлектронике, в том числе при создании устройств для мульти-, гипер- и ультраспектральной селекции.

6. Технологии формирователей сигналов изображений с цифровым выходом, обеспечивающие оптимальный синтез многоспектральных изображений, что позволяет преодолеть эффект нулевого радиационного контраста, который приводит к принципиальной неразличимости целей однодиапазонным прибором [6]. Они обеспечивают проведение радиометрических измерений, количественный анализ температурных градиентов сцены и т. п.

7. Фотоэлектроника многорядных (обеспечивающих режим временной задержки и накопления с числом ступеней $N = 16$ — 32), а также крупноформатных матричных (с форматом до 6000×6000) фотоприемных устройств, работающих в ближней, средней и длинноволновой областях спектра, что чрезвычайно важно для космических применений в интересах метеорологии, экологического мониторинга, разведки ископаемых и т. п.

По-прежнему актуальным является совершенствование и поиск новых технологий синтеза фоточувствительных материалов для всех диапазонов УФ, видимого и ИК-излучений.

Основные полупроводниковые фоточувствительные материалы

Проблема обеспечения разработок в области ИК-фотоэлектроники отечественными фоточувствительными материалами по-прежнему стоит достаточно "остро". За последнее десятилетие промышленный выпуск большинства из них, к сожалению, прекратился. Однако в 2009 г. реше-

ние о восстановлении производства ряда важнейших из полупроводниковых и оптических материалов было принято, и разработки технологии на новом качественном уровне вместе с мероприятиями по организации промышленного выпуска начали реализовываться. На рис. 1 воспроизведен перечень основных полупроводниковых фоточувствительных материалов, создание производства которых намечено в период до 2016 г.

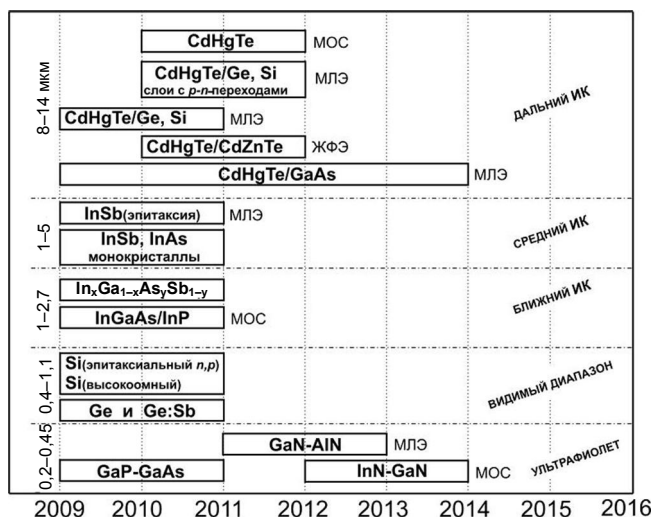


Рис. 1. Состояние разработки полупроводниковых фоточувствительных материалов

Сюда входят КРТ, антимонид индия, легированный и высокоомный кремний, легированный германий, арсенид индия, твердые растворы GaP—GaAs, GaN—AlN, InN—GaN, InGaAs, предназначенные для создания фотоприемных устройств на области спектра от ультрафиолетового до инфракрасного.

Рассмотрим кратко состояние с разработкой технологий важнейших из них.

Наиболее высокая чувствительность систем в дальнем спектральном ИК-диапазоне 8—12 мкм в настоящее время достигнута для фотодиодных матриц на основе КРТ, а в среднем спектральном диапазоне 3—5 мкм для фотодиодных матриц из антимонида индия (InSb). Для промышленного производства таких матричных приемников, особенно в последние годы, в подавляющем большинстве используются эпитаксиальные слои, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на оптически прозрачных подложках большого диаметра. Метод МЛЭ к настоящему времени практически вытеснил все другие методы выращивания КРТ. Характерно, что разработка и выпуск материала МЛЭ КРТ сосредоточены в тех же фирмах, которые выпускают и сами фотоприемники и только для собственных нужд. К настоящему времени среди подложечных материалов для КРТ выбор за рубежом остановлен на

трех: кадмий—цинк—теллур (КЦТ), кремний и германий. В США (Raytheon Vision System, Rockwell Scientific Company, Teledyne Imaging Sensors, DRS Sensors&Targeting Systems и др.) в основном используют подложки из КЦТ и кремния. При этом предпочтение отдается кремнию, как наиболее перспективному для массового производства МФПУ, дающего возможность значительного снижения стоимости приборов за счет использования достаточно дешевой подложки большого диаметра. Цена за квадратный сантиметр КЦТ в среднем составляет 250 дол., тогда как квадратный сантиметр кремния стоит меньше 1 дол. Достигнутые характеристики и низкая дефектность КРТ МЛЭ на подложках из кремния диаметром 100 и 150 мм позволяют массово выпускать матричные приемники с числом работающих элементов более 99,5 %. Французская фирма Sofradir в качестве подложки для МЛЭ КРТ выбрала германий. Несмотря на небольшое удорожание за счет меньшего рассогласования постоянных решетки и некоторых других факторов на Ge получено наилучшее качество КРТ МЛЭ на подложках, альтернативных по отношению к CdZnTe. Для производства МФПУ изготавливаются структуры с диаметром 100 и 150 мм, обеспечивая производство приемников на двух заводах фирмы. Можно заключить, что проблема технологии МЛЭ КРТ и организация серийного выпуска материала за рубежом решена. Основные работы там сосредоточились на многослойных структурах для многоспектральных приборов, материале для создания лавинных структур в КРТ для получения 3D-изображений и т. п.

В России наиболее отработанным методом промышленного производства эпитаксиальных слоев КРТ (ЭС КРТ) по-прежнему остается жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ) [7, 8]. По этой технологии получают ЭС КРТ p-типа на подложках КЦТ диаметром 20—35 мм с толщиной слоя 10—20 мкм, составом x от 0,2 до 0,3 мольной доли CdTe и однородностью $\Delta x = \pm 0,002$. Концентрация и подвижность при 77 К $n_p = (1-3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $\mu_p \geq 400 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, время жизни неосновных носителей заряда $\tau \geq 20 \text{ нс}$, плотность дислокаций $\leq 5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$. Однако технологические возможности ЖФЭ не позволяют получать приемлемую для крупноформатных МФПУ плоскостность эпитаксиальных структур, что делает этот процесс неконкурентоспособным по сравнению с другими методами и, в первую очередь, с МЛЭ, особенно при больших диаметрах подложки. Кроме того, достаточно сложно получить подложки КЦТ большого размера, а стоимость квадратного сантиметра КЦТ слишком высока.

Молекулярно-лучевая технология отечественного материала КРТ пока реализована только на подложках из арсенида галлия диаметром 50 мм (ИФП СО РАН) [9]. Толщина слоя КРТ 8—10 мкм,

состав x от 0,2 до 0,3 мольной доли CdTe (однородность $\Delta x = \pm 0,003$), при 77 К концентрация $n_p = (5-20) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и подвижность $\mu_p \geq 400 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ (нелегированные слои) и $\mu_p \geq 250 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ (легированные), время жизни неравновесных носителей заряда $\tau \approx 10 \text{ нс}$ (нелегированные) и $\tau \geq 50 \text{ нс}$ (легированные). Процесс МЛЭ чрезвычайно чувствителен к материалу подложки, состоянию ее исходной поверхности и режимам роста слоев (плотность потока компонентов, температура и др.). Любые отклонения от оптимальных условий приводят к структурному несовершенству выращенных слоев и большой плотности ростовых V -дефектов. V -дефекты — это характерные для МЛЭ прорастающие через эпитаксиальный слой "поверхностные кластеры", размеры которых могут достигать десятков микрон. Поперечные размеры этих кратеров обычно увеличиваются с толщиной эпитаксиального слоя, напоминая латинскую букву V [10]. Природа и механизмы образования V -дефектов сейчас окончательно устанавливаются. Показано, что существенную роль в их образовании играют возмущения рельефа поверхности буферного слоя и захват избыточного теллура на макроступенях роста на начальных стадиях эпитаксии [11]. Подложка из GaAs имеет значительное рассогласование с КРТ по постоянной решетки (более чем на 14 %), плотность V -дефектов в КРТ МЛЭ в отечественном материале составляет от 400 до 1000 см^{-2} , плотность дислокаций превышает 10^6 см^{-2} . Кроме того, мышьяк и галлий, образующие подложку, имеют очень высокие коэффициенты диффузии в КРТ, что может приводить к температурной и временной нестабильности слоев КРТ, выращенных на подложке из арсенида галлия. Такие параметры отечественных ГЭС КРТ МЛЭ приводят к значительному количеству неработающих элементов в МФПУ (до 3 %), что затрудняет применение таких приборов в решении ряда задач (например, для тепlopеленгации точечных целей). В настоящее время ведется разработка технологии МЛЭ КРТ на альтернативных подложках из Ge, по МЛЭ-технологии многослойных КРТ-структур с p - n -переходами, а также по поиску усовершенствованных методов МЛЭ при выращивании на подложках из GaAs. Целью этих разработок, в конечном итоге, является создание участков промышленного выпуска высокосовременного материала КРТ с диаметром не менее 100 мм.

Технология получения эпитаксиальных структур InSb методом МЛЭ в России пока не разработана. За рубежом для изготовления ЭС InSb МЛЭ в качестве подложки используют высоколегированный InSb, который обладает значительным пропусканием в требуемом спектральном диапазоне 3—5 мкм за счет сдвига края области собственного по-

глощения вследствие эффекта Бурштейна—Мосса и позволяет подавать регистрируемое излучение сквозь подложку на матрицу фоточувствительных элементов в эпитаксиальном слое. Такая подложка является идеальной для выращивания качественных слоев InSb, поскольку постоянные кристаллической решетки подложки и слоя практически совпадают, а выращенные эпитаксиальные слои InSb имеют параметры и кристаллическое совершенство, не уступающее объемным монокристаллам (единичные дефекты на площади 1 см^2). Альтернативной технологией является технология ГЭС КРТ МЛЭ с составом x порядка 0,3 мольной доли CdTe, что обеспечивает фоточувствительность в той же области спектра, что и антимонид индия.

Наиболее перспективными для создания матричных приемников на области спектра 1—2 и 1—3 мкм выглядят два материала: $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Для первого, при $x = 0,53$ имеем $\lambda_{\text{гр}} \approx 1,68 \text{ мкм}$ (300 К), для второго — при $x = 0,44$ $\lambda_{\text{гр}} \approx 2,55 \text{ мкм}$. Постоянная решетки a_0 в $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ равна $5,869 \text{ \AA}$ и практически совпадает с постоянной решетки в InP (рис. 2), что позволяет применять фосфид индия в качестве подложечного материала при эпитаксиальном выращивании $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$. Заметим, что $\text{In}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$, в котором постоянная решетки $a_0 = 5,985 \text{ \AA}$, имеет более продвинутую в ИК-область длинноволновую границу фоточувствительности $\lambda_{\text{гр}} \approx 2,53 \text{ мкм}$ и поэтому такой материал выглядит более предпочтительным по сравнению с $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$. Однако для выращивания $\text{In}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$ на подложках из InP [12] или GaAs [13] необходимы буферные слои из InAsP или InGaAs, что усложняет технологию изготовления.

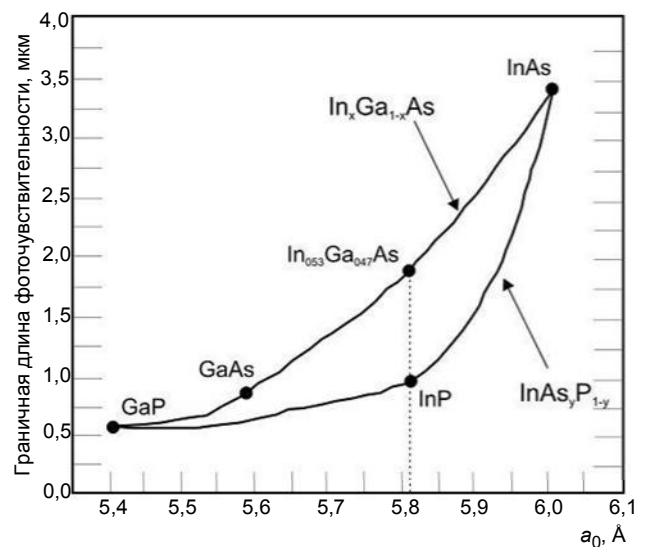


Рис. 2. Зависимость граничной длины фоточувствительности от постоянной решетки a_0 для различных материалов

В настоящее время в России завершается разработка усовершенствованной технологии изготовления и восстановление выпуска слоев

$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ методами МОС-гидридной эпитаксии на подложках из InP с ориентацией (100), концентрацией основных носителей зарядов $n = (1-10) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, подвижностью электронов не менее $6000 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ при 300 К (НИИ "Полус" им. М. Ф. Стельмаха), что должно обеспечить изготовление на их основе матричных неохлаждаемых фотоприемных устройств с $\lambda_{\text{гр}} \cong 1,68 \text{ мкм}$.

Известны несколько десятков полупроводников и полупроводниковых соединений, обнаруживающих фоточувствительность в УФ-области спектра [13—17]. Наиболее часто в разработках УФ-фотоприемников упоминаются Si , SiC , твердые растворы GaP-GaAs , AlN-GaN , естественные и синтетические алмазы и алмазные пленки. Спектральные зависимости фоточувствительности некоторых из них приведены на рис. 3. Последнее время заметные результаты [18, 19] получены для

УФ-ФПУ на основе естественных и искусственных алмазов (ИРЭ РАН). Вряд ли можно назвать материал, оптимальный во всех отношениях для создания УФ-приемников, каждый из них обладает своими преимуществами и недостатками [13]. В отечественной промышленности наиболее распространены материалы на основе GaP , GaAs и их твердых растворов [20], восстановление выпуска которых вместе с соединениями AlN-GaN , InN-GaN запланировано на 2011—2014 гг.

Основным условием успешного развития отечественной фотоэлектроники, как и оптики и оптоэлектроники в целом, является планомерное развитие научной и производственной базы оптического материаловедения, включая новые, более совершенные, технологии фоточувствительных материалов.

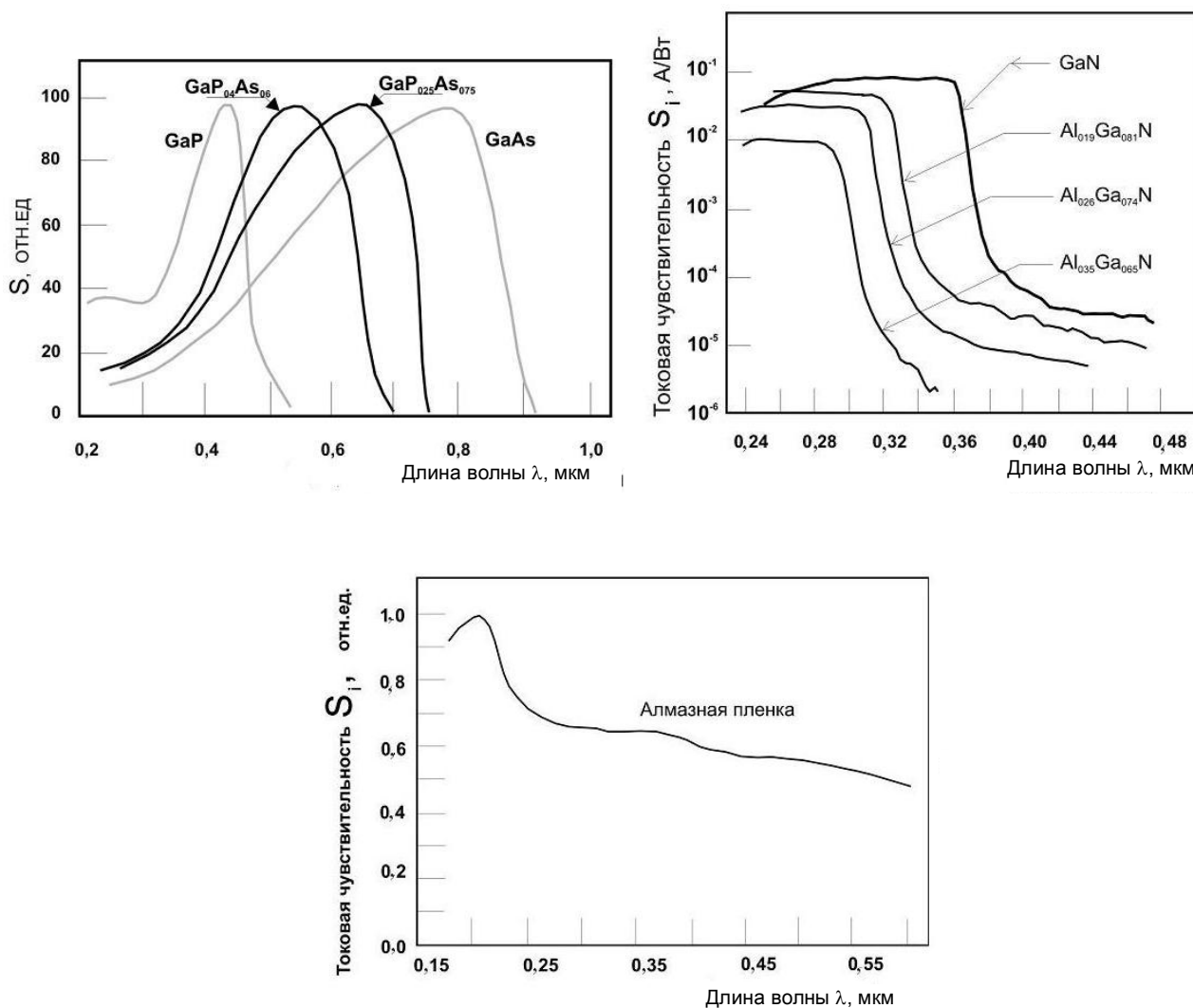


Рис. 3. Спектральные зависимости фоточувствительности различных материалов

Твердотельные фотопреобразователи для области спектра 1—2 мкм

Исключительно важная роль этого диапазона в оптоэлектронике связана с несколькими причинами. По сравнению с хорошо освоенным в технике ночного видения диапазоном 0,4—0,9 мкм, средняя величина естественной ночной освещенности (ЕНО) в диапазоне 1,4—2,0 мкм на два порядка выше (рис. 4) и составляет $(1,5—10) \cdot 10^{-9}$ Вт·см⁻²·мкм⁻¹·ср [21—23]. Это объясняется эффектом свечения атмосферы в ночное время суток, при котором высвобождается энергия излучения Солнца, накопленная атмосферой в течение дня. Механизм возбуждения пока до конца не ясен, но считается, что он носит нетепловой характер и основную роль здесь играют переходы между колебательными состояниями радикалов ОН [22]. В диапазоне 1,4—2,0 мкм заметно выше контраст между объектами наблюдения и фоном, лучше прозрачность атмосферы, меньше яркость атмосферной дымки и др. Из-за разницы в отражательной способности материалов, из которых изготовлена камуфляжная форма разных стран, в диапазоне 1,4—2,0 мкм можно не только вести обнаружение живой силы на фоне зеленой растительности, но и отличать "своего" от "чужого". Наконец, в области спектра 1,4—2,0 мкм сосредоточено излучение современных активных и активно-импульсных ОЭС с лазерной подсветкой на длинах волн 1,54 и 1,7 мкм. Все это придает особую роль исследованиям в области создания и поиска новой элементной базы для ОЭС на область спектра 1,4—2,0 мкм.

В настоящее время в этой области сформировались два основных базовых направления (табл. 1): вакуумная фотоэлектроника на основе ЭОП III, III⁺ и IV поколений с фотокатодами из соединений InGaAs—InGaAsP с отрицательным электронным сродством и твердотельная фотоэлектроника на основе фотодиодных структур, в первую очередь матричных, из твердых растворов InGaAs, InGaSb, InGaAsP и широкозонных полупроводников CdHgTe. Для современных ЭОП достигнуты весьма высокие параметры: интегральная чувствительность фотокатодов около 2000 мкА/лм, разрешающая способность до 84 штр./мм, отношение сигнал/шум более 30 [23]. Несмотря на высокую стоимость таких ЭОП, они находят широкое применение в ПНВ, особенно для ночного пилотирования вертолетов (очки ночного видения AN/AVS-9 и др.). Тем не менее, главной задачей в этой области остается создание ЭОП с областью чувствительности, продвинутой в длинноволновую часть спектра 1,4—1,8 мкм. При использовании фотокатодов с барьерами Шоттки или гетеропереходами вблизи поверхности, а также на основе In_xGa_{1-x}As с высоким содержанием бинарной компоненты InAs ($x \sim 0,55$) удается получить длинноволновую границу фоточувствительности вблизи 1,7—1,8 мкм. Однако из-за падения квантовой эффективности фотокатода по мере продвижения в длинноволновую область чувствительность таких ЭОП заметно падает. По этой причине определенные перспективы создания новых поколений приборов ночного видения ряд исследователей связывает с использованием твердотельных полупроводниковых фотопреобразователей, в первую очередь матричных.

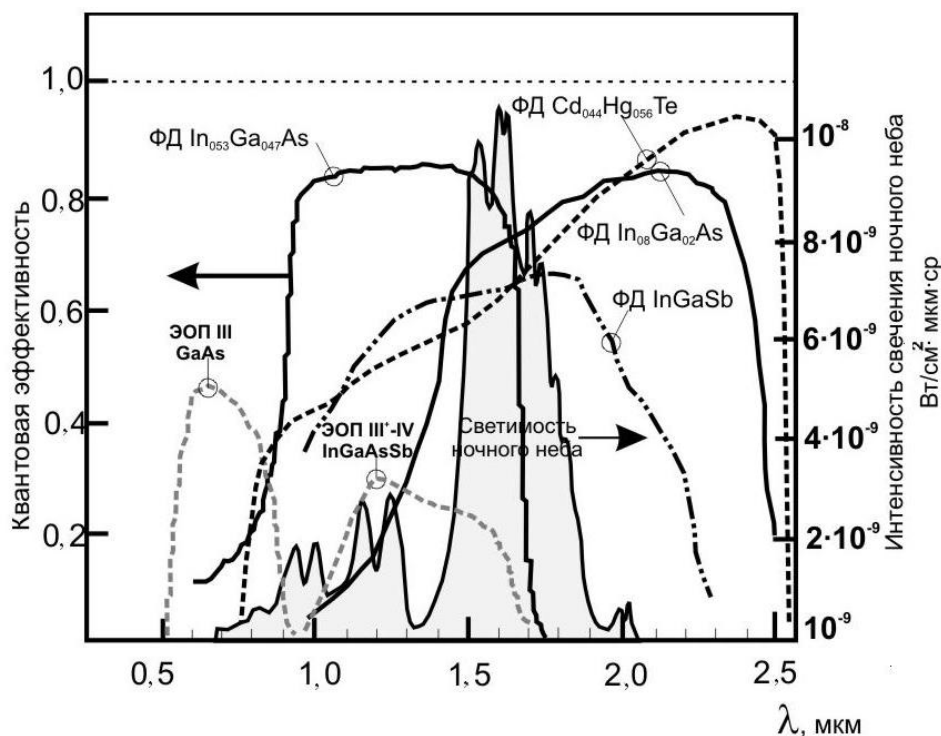


Рис. 4. Средняя величина естественной ночной освещенности и фоточувствительность некоторых материалов

В табл. 1 приведены полупроводниковые материалы, наиболее часто используемые при разработках твердотельных фотоприемных устройств на область спектра 1—2 мкм: в основном это твердые растворы бинарных компонентов GaAs—InAs ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$), InSb—GaSb ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$), четверные соединения $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, а в последние годы к ним активно присоединяется твердый раствор CdTe—HgTe ($\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$). Во всех этих соединениях, меняя состав твердого раствора $\langle x \rangle$, можно получить полупроводники с граничной длиной фоточувствительности вблизи 2—2,5 мкм. Из $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ и $\text{Cd}_{0.44}\text{Hg}_{0.56}\text{Te}$ за рубежом получены матричные фотодиоды с размерами элементов 25×25, 30×30 и 18×18 мкм и созданы оптико-электронные камеры с очень малыми габаритами 5,9×2,8×1,7 см [2, 24—30]. Имеются сообщения о разработке быстродействующих матричных фотоприемных устройств на основе лавинных фотодиодов, в том числе для создания камер с 3D-изображениями [31, 32]. На рис. 5 показаны частотно-

контрастные характеристики нескольких ПНВ на основе ЭОП с различной разрешающей способностью и на основе твердотельных МФПУ с различными размерами фоточувствительных элементов. Для достижения тех же значений ЧКХ, которые могут иметь ПНВ на основе ЭОП с разрешающей способностью 64 шт/мм (модели ЭОП OMNI IV—V [23]), в приборах на основе твердотельных МФПУ необходимо иметь размер фоточувствительных элементов не более 15×15 мкм. Однако даже при достижении в технологии ЭОП разрешающей способности ~80 шт./мм, в случае создания твердотельного МФПУ из $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с размерами элементов $\leq 10 \times 10$ мкм приборы ночного видения на его основе оказываются по частотно-контрастной характеристике лучше, чем ПНВ на основе ЭОП. Это еще раз указывает на актуальность работ по твердотельным фотопреобразователям на область спектра 1—2,5 мкм и на необходимость ускорения работ в этой области.

Таблица 1

Основные свойства вакуумных и твердотельных фотопреобразователей на область спектра 0,4—2,0 мкм

Материал	Область спектра или $\lambda_{гр}$, мкм	Квант. эффект., %	Интегр. чувствит., мкА/лм. Разреш. способн., D^* , см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹	Тип, формат, размер элемента
Фотокатоды для ЭОП поколений III ⁺ —IV [1, 5, 7]				
<i>p</i> -InGaAsP/InP	0,4—1,6	10		ТЕР-фотокатод с гибридным гетеропереходом
<i>p</i> -InGaAs/InGaP	0,4—1,7	20—30	1800—2200	ТЕР-фотокатод с гетеропереходом
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$	0,4—1,8	20	84 штр./мм	Фотокатод с высоким содержанием InAs
Твердотельные фотопреобразователи второго поколения на основе фотодиодов [2, 3, 6, 8—10]				
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$	1,7			320×256 (25×25 мкм)
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$				
$x = 0,53$	1,7		$> 10^{14}$ (20 °C)	320×240
$x = 0,67$	2,0		$\sim 10^{15}$ (-23 °C)	1×512
$x = 0,71$	2,2			
$x = 0,82$	2,5			
$\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}$	2,53 (300 K) 2,43 (250 K)		$R_0A \geq 8 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	1×1 (45×500 мкм)
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$	2,1		$1 \cdot 10^{10}$	1×1 (∅200—300 мкм)
$\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Sb}/\text{GaSb}$	2,04		$3,3 \cdot 10^{10}$ (20 °C)	1×1 (∅0,8—2,9 мм)
$\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Sb}/\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.8}\text{Sb}$	1,68		$5,5 \cdot 10^{10}$ (20 °C)	
$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$				
$x = 0,525$	1,94 (240 K)	85		256×1000
$x = 0,44$	2,55			320×256 (30×30 мкм)
$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$	2,05	$> 60 \%$		640×512 (18×18 мкм)

Примечание. ТЕР-фотокатод — Transferred Electron Photocathode.

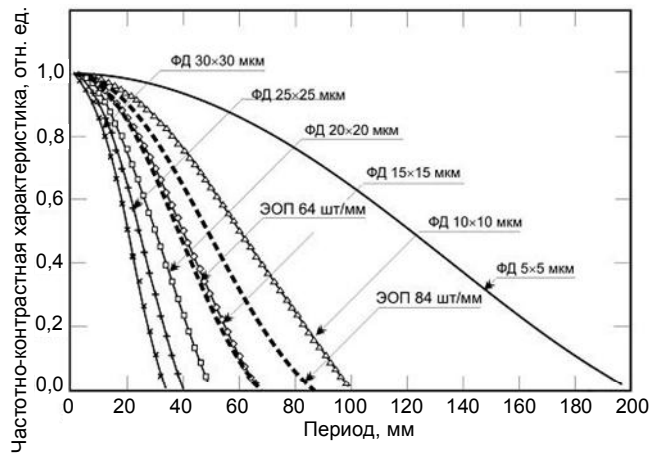


Рис. 5. Частотно-контрастные характеристики нескольких ПНВ на основе ЭОП с различной разрешающей способностью и на основе твердотельных МФПУ с различными размерами фоточувствительных элементов

При создании матричных фотодиодов для твердотельных фотопреобразователей в НПО "Орион" использовался эпитаксиальный $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, выращенный МОС-гидридной технологией на подложках из InP с кристаллографической ориентацией (100). С обзором основных физических свойств такого материала можно ознакомиться в работе [33]. Структура элементарной фоточувствительной ячейки матрицы представлена на рис. 6 и состоит из подложки сильнолегированного монокристаллического $n^+\text{-InP}$, а также промежуточного эпитаксиального слоя $n^+\text{-InP}$, слаболегированного поглощающего излучение слоя $n^-\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ и пассивирующего слоя $n^-\text{InP}$, в котором локализована изготовленная диффузией кадмия область p^+ -типа проводимости. На первом этапе работ шаг и формат матричной структуры были выбраны 60×60 мкм и $N \times N = 128 \times 128$ элементов. При проектировании кремниевого n -МОП-мультиплексора был разработан трехтранзисторный вариант построения ячейки накопления фотосигналов (рис. 7). В такой ячейке, в отличие от принятых в тепловизионных МФПУ схемах построения с прямой токовой инжекцией, происходит преобразование заряд—напряжение, а не ток—напряжение. При этом выходное напряжение $U_{\text{вых}} = Q_{\text{вх}}/C_{\text{ос}}$ формируется не непрерывно в течение всего цикла накопления, а только в момент считывания. Далее происходит последовательный опрос всех N ($N = 128$) сигнальных шин матрицы накопительных ячеек и вывод сигнала на общий вывод мультиплексора через выходной КМОП-повторитель, выполненный по четырехтранзисторной схеме. Такой подход обеспечил возможность изготовления мультиплексора с проектными нормами 2 мкм и одним слоем металлизации. Изготовленный описанным способом матричный приемник помещался в специально разработанную конструкцию, показанную

на рис. 8. Спектральная характеристика фоточувствительности представлена на рис. 9, а основные параметры представлены ниже. На рис. 10 представлено тепловизионное изображение, полученное с помощью описанного МФПУ.

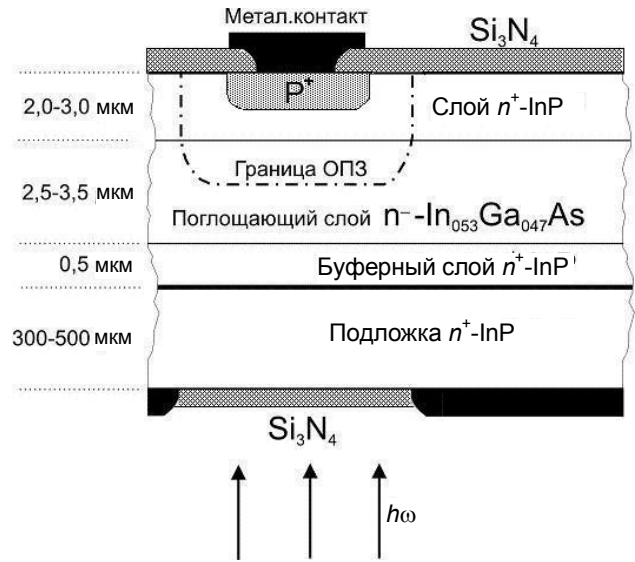


Рис. 6. Структура элементарной фоточувствительной ячейки матрицы

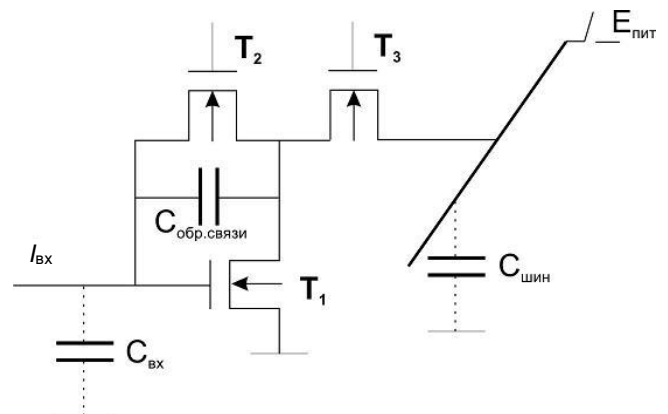


Рис. 7. Трехтранзисторный вариант построения ячейки накопления фотосигналов

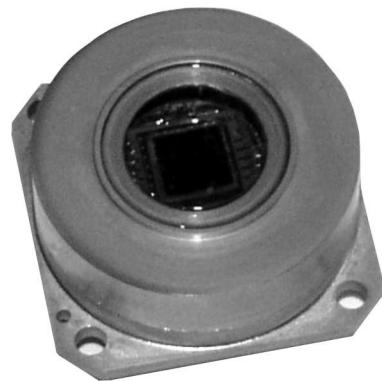


Рис. 8. Матричный приемник внутри специально разработанной конструкции

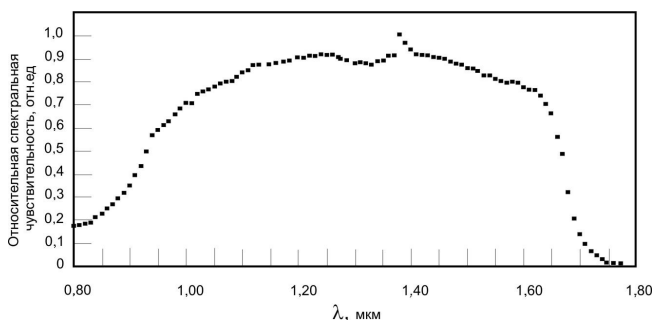


Рис. 9. Спектральная характеристика фоточувствительности



Рис. 10. Тепловизионное изображение, полученное с помощью МФПУ

Основные параметры МФПУ на основе $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ формата 128×128

Коротковолновая граница спектра фоточувствительности по уровню 0,5, мкм.....	0,93
Длинноволновая граница спектра фоточувствительности по уровню 0,5, мкм.....	1,67
Эквивалентная шуму разница температур при времени накопления 25 мс, относительном отверстии 0,7:1 и температуре фона 300 К, мК.....	0,8
Вольтовая чувствительность при времени накопления 25 мс, относительном отверстии 0,7:1 и температуре фона 300 К, мВ·Вт ⁻¹	6,0
Темновой ток при температуре фона 300 К, рА.....	6,0

Ближайшей задачей является создание технологии МФПУ на основе соединения $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ формата не менее 320×256 с уменьшенным размером фоточувствительных элементов.

Матричные ФПУ на основе InSb и CdHgTe

К настоящему времени в НПО "Орион" разработаны технологии промышленного производства как типоразмерного ряда самих матриц из КРТ и антимонида индия (форматы 2×96, 2×256, 4×288, 256×256, 320×256, 384×288), так и кремниевых мультиплексоров для них [34—36]. Модули формирования тепловизионного видеосигнала (МФТВ) предназначены для визуализации тепловых полей в тепловизионной и тепlopеленгационной аппаратуре и являются законченными устройствами, требующими для своей работы только

подачи напряжений электропитания. МФТВ формирует стандартный телевизионный видеосигнал по ГОСТ 7845 с расположенным в центре раstra размером изображения 512×512 пикселей, соответствующий тепловизионной картине в фокальной плоскости матричного фотоприемного устройства. Структура МФТВ показана на рис. 11.

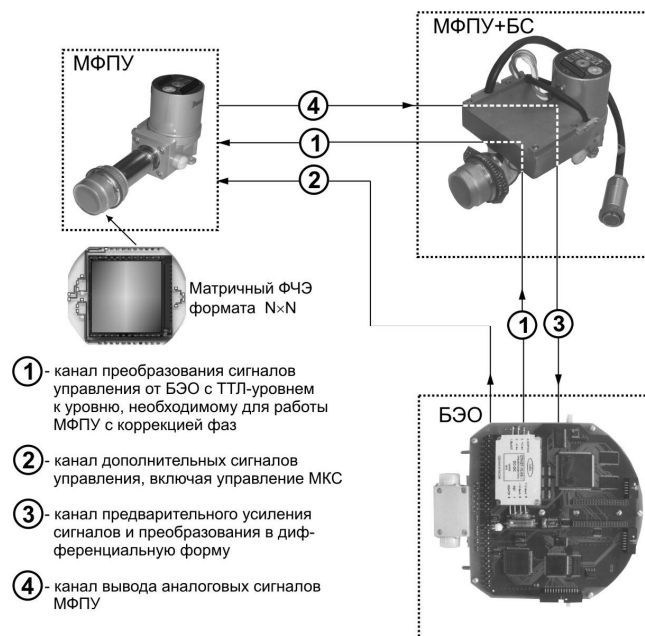


Рис. 11. Структура МФТВ

МФТВ обеспечивает вычитание фоновой составляющей сигналов фоточувствительных элементов, коррекцию неоднородности чувствительности ФЧЭ, деселекцию дефектных ФЧЭ, программируемое изменение чувствительности. По форматам и основным параметрам разработанные матричные ФПУ соответствуют зарубежным аналогам. Различие есть в функциональных возможностях кремниевых мультиплексоров для ВЗН-матриц: в известных зарубежных аналогах суммирование ведется в "холодной" зоне в аналоговой форме, а в отечественных МФПУ — в блоке электронной обработки (БЭО) после оцифровки фотосигналов. Все приборы имеют унифицированную конструкцию, состыкованную с микрокриогенной системой охлаждения интегрального типа. Основные параметры выпускаемых объединением МФПУ и МФТВ представлены в табл. 2. Как МФПУ, так и МФТВ прошли или продолжают проходить апробацию в ряде тепловизионных и тепlopеленгационных систем различного назначения. В настоящее время в объединении ведется разработка МФТВ на основе КРТ с числом элементов 6×576, где предусмотрено суммирование фотосигналов в "холодной" зоне.

Таблица 2

Матричные МФПУ и МФТВ из CdHgTe (КРТ) и антимонида индия (InSb) для тепловидения и тепловеленгации в спектральных диапазонах 8—12 и 3—5 мкм с МКС интегрального типа (2010 г.)

Тип, формат, полупроводниковый материал	Наличие электроники обработки фотосигналов и системы охлаждения			Число сигнальных выводов	Основные параметры				
	БС	БЭО	МКС		Спектр. диапазон, мкм	Средняя обн. способность, см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹	Экв. шуму разн. темп., мК	Макс. частота вых. сигн., МГц	Кадровая частота, Гц
МФПУ 4×288, КРТ	+	-	+	8	8—10,5	≥ 10 ¹¹	≤ 20	7,5	—
МФПУ 256×256, InSb	-	-	+	8	3,6—5,0	≥ 1,3·10 ¹¹	≤ 20	8,0	500
МФТВ 256×256, InSb	+	+	+	-	3,6—5,0	—	≤ 20	—	50
МФПУ 256×256, КРТ	-	-	+	2	8—10,3	≥ 4·10 ¹⁰	≤ 40	4,0	50
МФТВ 256×256, КРТ	+	+	+	-	8—10,3	—	≤ 40	—	50
МФПУ 320×256, InSb	+	+	+	8	3,4—4,8	≥ 1,5·10 ¹¹	≤ 20	8,0	400
МФПУ 384×288, КРТ	+	+	+	2	8—10,5	≥ 4·10 ¹⁰	≤ 40	4,0	50

Примечание. БС — блок сопряжения; БЭО — блок электронной обработки фотосигналов; МКС — микрокриогенная система охлаждения.

Дальнейшее развитие этого направления связывается с увеличением числа ступеней накопления и числа фоточувствительных элементов в строке МФПУ. Для МФПУ из антимонида индия с цифровым режимом ВЗН [37] на область спектра 3—5 мкм было установлено, что эффективное число ступеней накопления лежит в пределах 16—32. При этом пороговая мощность уменьшается как $P_{\lambda m} \sim N^{-(0,44-0,45)}$, что близко к идеальному закону $P_{\lambda m} \sim N^{-0,5}$. При $N \leq 16$ основную роль в формировании шумовых напряжений играют случайные выбросы амплитуды выборки, а при $N > 32$ — долговременные процессы, формирующие шумы типа "1/f". При числе суммирований $N = 32$ и фоновом потоке $Q_B \cong 5 \cdot 10^{-7}$ Вт·см⁻² была реализована пороговая мощность $P_{\lambda m} \cong (3-4) \cdot 10^{-15}$ Вт·эл⁻¹. Для спектрального диапазона 8—12 мкм оптимальное число ступеней накопления N_{opt} в режиме ВЗН окончательно не установлено. Для $N = 6$ в МФПУ формата 6×576 из КРТ реализовано значение $D^* \approx 1,5 \cdot 10^{11}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹.

На рис. 12 и 13 показаны два варианта топологии МФПУ формата 6×576. При использовании топологии, показанной на рис. 13, возможна замена МФПУ формата 4×288 на МФПУ 6×576 без изменения габаритных и посадочных размеров приемника, а также использование одного и того же входного объектива тепловизионной аппаратуры. Оптимальное значение числа элементов в строке ВЗН-матрицы целесообразно выбирать, например, исходя из соображений возможности замены поставленных в аппаратуру приемников на более многоэлементные без кардинальной трансформации

входной оптической системы и посадочного места МФПУ.

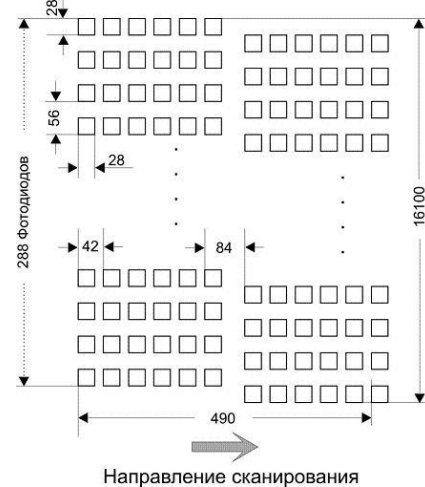


Рис. 12. Первый вариант топологии МФПУ формата 6×576

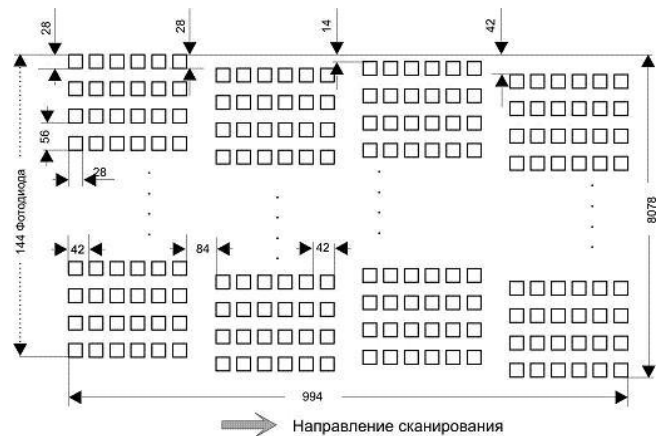


Рис. 13. Второй вариант топологии МФПУ формата 6×576

Для "смотрящих" матриц коротковолнового (1—3 мкм) и средневолнового (3—5 мкм) диапазонов спектра из КРТ за рубежом в настоящее время реализованы форматы порядка 1280×1024 и 2048×2048 элементов при шаге порядка 15 мкм [34, 35]. С использованием формата 1280×1024 становится возможным при "микросканировании" получить тепловизионное изображение с разрешением 2650×2048 элементов. Архитектура построения подобных матриц известна и их проектирование не вызывает больших затруднений. Однако во всех сообщениях о "сверхбольших" матрицах подчеркивается, что ключом к решению проблемы является создание технологии высококачественного исходного материала КРТ большой площади [38, 39].

Быстродействующие ФПУ и 3D-изображения

Построение трехмерных тепловизионных 3D-изображений в настоящее время, по существу, связывается с процессом цифровой обработки 2D-изображения при внесении в него дополнительной информации о наблюдаемом объекте [40]. К такой дополнительной информации в большинстве случаев относят сведения о расстоянии (дистанции) до отдельных фрагментов объекта или наблюдаемой в тепловизионном $\Delta\lambda$ диапазоне сцены. Такие данные могут быть получены путем регистрации монохроматического излучения λ_1 , отраженного от объекта при его подсветке импульсным лазером. Таким образом, фоточувствительные элементы матрицы для 3D-тепловидения должны не только регистрировать собственное излучение цели, но и достаточно слабый отраженный импульсный фотосигнал, т. е. иметь малую инерционность и достаточную пороговую чувствительность. Например, по данным работы [41], при глубине наблюдаемой сцены порядка 1,5 м для построения 3D-изображения необходимо иметь приемник с инерционностью не хуже 10 нс, при глубине 15 м — не хуже 100 нс и т. д. В работе [41] описаны разработки быстродействующих детекторов из Si, Ge, SiGe, GaAs, InGaAs для спектральных диапазонов от 0,6 до 1,54 мкм на основе фотодиодов со структурой $n^+n^-p^+$ с размерами фоточувствительной площадки от 20 до 350 мкм и быстродействием $(4—6,5) \cdot 10^{-11}$ с, в том числе охлаждаемых до 80 К. Их применение в системе лазерной дальнометрии позволило определять расстояние до искусственного спутника Земли на дистанции около 20 тыс. км с точностью порядка 1 см. Дальномерно-тепловизионные активно-пассивные системы обеспечивают обнаружение и идентификацию объектов на значительно больших расстояниях, чем обычная тепловизионная аппаратура.

Для создания матричных детекторов $N \times N$ в системах 3D-изображений на основе соединений CdHgTe в основном используются фотодиоды со структурой n^+n^-p планарного типа [42, 43] либо изготовленные по технологии "с вертикальными стенками" [44], что отражено на рис. 14.

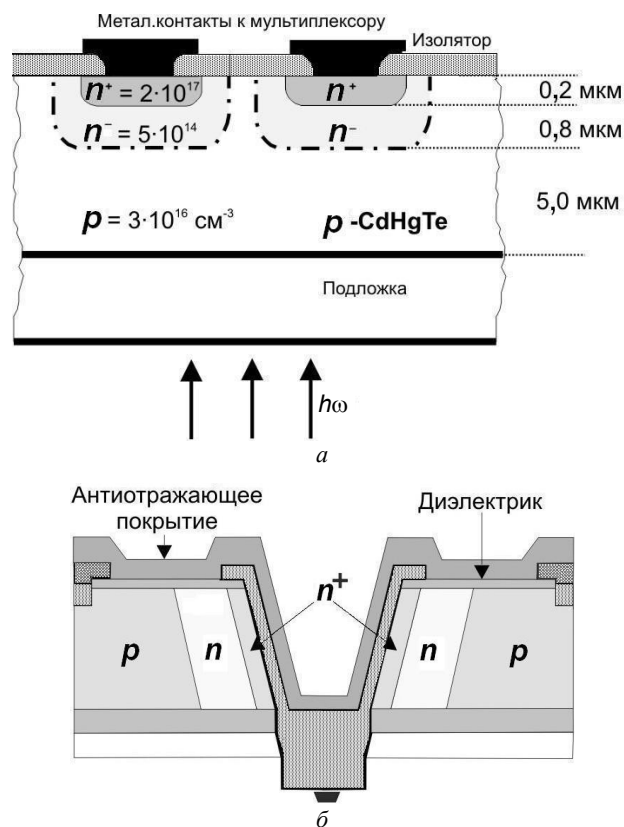


Рис. 14. Фотодиод со структурой n^+n^-p -планарного типа

В таких фотодиодах со структурой "n на p" имеет место механизм лавинного усиления, когда ИК-излучение поглощается в слаболегированной n-области и фотогенерированные электроны, попадая в относительно сильное электрическое поле p-n-перехода, образуют лавину, приводя к усилению фототока. К настоящему времени за рубежом на лавинных фотодиодах из КРТ с $x \approx 0,3$ ($\Delta\lambda = 3—5$ мкм) получены коэффициенты усиления фототока от 100 до 1000 при практически неизменном отношении сигнал/шум. Механизм лавинного усиления для фотодиодов на основе узкозонного КРТ теоретически рассмотрен в работе [45]. Некоторые схемы построения мультиплексов для матричных ФПУ на основе лавинных фотодиодов из КРТ приведены в работах [46, 47].

В НПО "Орион" разработан и выпускается целый ряд быстродействующих низкопороговых ФП и ФПУ для диапазонов спектра 0,8—0,9; 1,06; 1,3—1,54; 10,6 мкм на основе Si, Ge, InGaAs/InP, CdHgTe. В качестве фоточувствительных элемен-

тов используются фотодиоды со структурой $p^+ \pi l^+$ (π — материал, по свойствам близкий к собственному), $n^+ p l p^+$ (лавинные) и p - n . Постоянная времени таких ФП и ФПУ лежит в интервале $(3-50) \cdot 10^{-9}$ с, а пороговая мощность достигает значений $P_{\text{пор}} \leq 6 \cdot 10^{-10}$ Вт [48]. При использовании гетеродинного режима для специально разработанных ФПУ на основе фотодиодов из КРТ можно получить наиболее низкую из достигнутых пороговую мощность $P_{\text{пор}} \sim 5 \cdot 10^{-20}$ Вт·Гц⁻¹ в полосе частот более 1 ГГц [48]. На частотах $f \leq 40$ МГц для диапазона 8—12 мкм в гетеродинном режиме схожие характеристики можно реализовать и для фоторезисторов из КРТ [49]. В последнее время в объединении разработано специальное ФПУ в конструкции с интегральной микрокриогенной системой охлаждения для работы в высокочастотном гетеродинном режиме. Основные параметры разработанных быстродействующих ФПУ представлены в табл. 3.

Таблица 3

Основные свойства быстродействующих ФП и ФПУ
НПО "Орион"

Параметр	Материал фотодиода		
	CdHgTe	InGaAs/InP	Si
Число элементов, n	1	1	1
Размер ФЧЭ $A_{\text{ФЧЭ}}$, мм	0,18	0,05	0,5
Структура энергетических барьеров фотодиода	p - n	$p^+ \pi l^+$	$n^+ p l p^+$
Рабочая температура, °С	80	295	295
Верхняя граничная частота $f_{\text{в}}$, Гц	$5,1 \cdot 10^7$ Гц	$6 \cdot 10^8$ Гц	—
Быстродействие τ , с	—	—	$5 \cdot 10^{-8}$ с
Длина волны гетеродинного излучения $\lambda_{\text{г}}$, мкм	10,6	—	—
Мощность гетеродинного излучения $P_{\text{г}}$, мВт	0,1	—	—
Пороговая чувствительность, Вт·Гц ⁻¹	$1 \cdot 10^{-19}$	—	—
Пороговая мощность, Вт	—	$6 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-8}$

Очередным шагом в развитии фотоэлектроники для этого направления в объединении должны стать разработки технологии матричных фотодиодов лавинного типа на основе ряда материалов, перспективных для создания дальномерно-тепловизионных систем, а также методов и средств обработки фото-сигналов для построения 3D-изображений.

Заключение

В 1-й части данной статьи рассмотрено современное состояние и научно-технологические предпосылки развития ряда базовых технологий инфракрасной фотоэлектроники: полупроводниковых фоточувствительных материалов, твердотельных фотопреобразователей для ИК-, УФ- и терагерцовой областей электромагнитного излу-

чения, многоспектральных и быстродействующих приборов, метаматериалов и нанотехнологий для создания новых классов оптико-электронной аппаратуры. Представлены результаты создания ряда фотоприемных устройств, "смотрящих" и ВЗН-матриц из Cd₀Hg₀Te, InSb, InGaAs, GaPAs, PbS, PbSe, Si и Ge для областей спектра 8—12, 3—5, 1—2 мкм с числом элементов 2×96, 2×256, 4×288, 2×(2×288), 6×576, 128×128, 256×256, 320×256, 384×288 и др., систем цифровой обработки и синтеза изображений, матричных формирователей тепловизионного видеосигнала на их основе.

Во второй части данной статьи, публикуемой в следующем номере журнала, будет завершено рассмотрение состояния отечественных разработок и исследований в вышеуказанных направлениях.

Литература

1. Long J. P., Varadaraajian S., Matthews J., Schetzina J. F. UV-detectors and focal plane array imagers based on AlGaIn p - i - n -photodiodes // Optoelectronics Review. 2002. V. 10. No. 4. P. 254.
2. Photonics Spectra. 2004. V. 38. No. 2. P. 5, 78.
3. Rothman J., Perrais G., De Borniol E., Castelein P., Bajer N., Guellec F., Tchagaspanian M., Ballet P., Mollard L., Gout S., Perez A., Fournier M., Chamonal J.-P., Tribolet P.M., Destefanis G.. HgCdTe ADP-focal plane array development at CEA Leti-Minatec // Proc. SPIE. 2008. V. 6940. P. 69402N(1)—69402N(12).
4. Richards P. L. Bolometers for infrared and millimeter waves // J. Appl. Phys. 1994. V. 76. No. 1. P. 1—24.
5. Асеев А. Л. Наноматериалы и нанотехнологии для современной полупроводниковой электроники // Обзоры "Российские нанотехнологии". 2006. Т. 1. № 1—2. С. 97.
6. Тарасов В. В., Якушенок Ю. Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. — М.: Университетская книга; Логос, 2007.
7. Пономаренко В. П. Теллурид кадмия-ртути и новое поколение приборов инфракрасной фотоэлектроники // УФН. 2003. Т. 173. № 6. С. 649—665.
8. Пономаренко В. П., Филачёв А. М. Инфракрасная техника и электронная оптика. — М.: Физматкнига, 2006.
9. Sidorov Yu. G., Yakushev M. V., Pridachin D. N., Varavin V. S., Burdina L. D. The heteroepitaxy of II—VI compounds on the non-isovalent substrates (ZnTe/Si) // Thin Sol. Films. 2000. V. 367. P. 203.
10. Sabinina I. V., Gutakovskii A. K., Sidorov Yu. G., Dvoretzky S. A., Kuzmin V. D. Defect formation during growth of CdTe(111) and HgCdTe films by molecular beam epitaxy // Cryst. Growth. 1992. V. 117. P. 238.
11. Yakushev M. V., Babenko A., Kartashov D., Mikhailov N. N., Sabinina I. V., Sidorov Yu. G., Vasiliev V. V. V-defects at MBE-heteroepitaxy on GaAs(301) and Si(301) substrates // Proc. SPIE. 2005. V. 5957. P. 590.
12. Ettenberg M. H., Cohen M. J., Brubaker R. M., Lange M. J., O'Grady M. T., Olsen G. H. Indium Gallium Arsenide Imaging with Smaller Cameras, Higher Resolution Arrays and Greater Material Sensitivity // Ibid. 2002. V. 4721. P. 26.
13. Zimmermann John, L., Nemeth S., Colin T., Merken P., Borghs S., C.van Hoof. Extended In₀Ga₀As on GaAs Detectors for SWIR Linear Sensors // Ibid. 2001. V. 4369. P. 692—697.
14. Бланк Т. В., Гольдберг Ю. А. Полупроводниковые фотопреобразователи для ультрафиолетовой области спектра // ФТП, 2003. № 37. С. 1025.

15. Линьков В., Морозов А., Сидоров В. Локационные системы оптического диапазона комплексов ПВО надводных кораблей ВМС иностранных государств//Зарубежное военное обозрение. 2000. № 7. С. 47.
16. Кацапов Ф. М., Сергеев В. И. Перспективные материалы для элементной базы оптоэлектроники//Электронная промышленность. 2005. № 2.
17. Анисимова И. Д., Викулин И. М., Заитов Ф. А., Курмашев Ш. Д./Под ред. В. И. Стафеева. Полупроводниковые фотоприемники: ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра. — М.: Радио и связь, 1984.
18. Гуляев Ю. В., Алтухов А. А., Митягин А. Ю. Фотоприемники ультрафиолетового диапазона на основе алмаза 2а-типа для нового поколения аппаратуры наблюдения и распознавания объектов//Наука и технологии промышленности. 2006. № 5. С. 27.
19. Алтухов А. А., Митягин А. Ю., Феценко В. С. Матричный фотоприемник для регистрации изображений в ультрафиолетовой области спектра // Датчики и системы. 2010. № 1. С. 50.
20. Анисимова И. Д., Стафеев В. И. Фотоприемники ультрафиолетового диапазона на основе широкозонных соединений A_3B_5 // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 41.
21. Electro-Optical Imaging: System Performance and Modeling. Editor Lucien M. Biberman. SPIE Press, Bellingham, Washington, 2000.
22. Справочник по инфракрасной технике. Т. 1/Под ред. У. Вольфа и Г. Цисиса. — М.: Мир, 1995.
23. Волков В. Г. Приборы ночного видения новых поколений // Специальная техника. 2001. № 5. С. 2.
24. Escher J. T., Maloney T. J., Gregory P. E., Hyder S. B., Houng Y. M. Photoemission to 1.7 μm from an InP/InGaAs transferred-electron photocathode//IEEE Trans. Electron. Devices. 1978. V. ED-25. P. 1347.
25. John J., Zimmermann L., Nemeth S., Colin T., Merken P., Borghs S., van Hoof C. Extended $\text{In}_0.2\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ on GaAs Detectors for SWIR Linear Sensors//Proc. SPIE. 2001. V. 4369. P. 692.
26. Chorier P., Tribolet P., Fillon P. A. Manissadjian. Application needs and trade-offs for Short Wave Infrared detectors // Ibid. 2003. V. 5074. P. 363.
27. Eitenberg M. H., O'Grady M. T., Huang S., Cohen M. J. A miniaturized 320×256 indium gallium arsenide SWIR camera for robotic and unmanned aerial vehicle application // Ibid. P. 353.
28. Abedin M. N., Refaat T. F., Joshi R. P., Sulima O. V., Mauk M., Singh U. N. Characterization and Analysis of InGaAsSb Detectors // Ibid. P. 332.
29. Cabelli S. A., Pan J., Bernd S. G., Tennant W. E., Blackwell J. D., Bhargava S., Pasko J. G., Piquette E. C., Edwall D. D. High-Resolution Extended NIR Camera // Ibid. P. 343.
30. Refaat T. F., Abedin M. N., Singh U. N., Bhagwat V., Bhat I. B., Dutta P. S. Characterization of InGaSb detectors for 1.0 to 2.4 μm application // Ibid. 2004. V. 5406. P. 56.
31. Bitter M., Pan Z., Kristjansson S., Boman L., Gold R., Pauchard A. InGaAs-on-Si Photodetectors for High-Sensitivity Detection // Ibid. P. 1.
32. Boisvert J., Masalykin A., Kinsey G. S., Isshiki T., Haddad M., Sudharsanan R., Zheng X., Campbell J. C. Characterization of InAlAs/InGaAs APD arrays for SWIR imaging applications // Ibid. P. 13.
33. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. — г. Новосибирск: Наука, 2003.
34. Филачев А. М., Пономаренко В. П., Таубкин И. И., Ушакова М. Б. Инфракрасные матрицы и тенденции их развития (Части 1 и 2) // Прикладная физика. 2003. № 1. С. 105. № 2. С. 54.
35. Бурлаков И. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М., Дегтярев Е. В. Фотоприемные устройства для тепловизионной аппаратуры второго поколения // Там же. 2007. № 2. С. 43.
36. Гринченко Л. Я., Пономаренко В. П., Филачев А. М. Современное состояние и перспективы инфракрасной фотоприемники // Там же. 2009. № 2. С. 57.
37. Чижко В. Ф., Касаткин И. Л., Бурлаков И. Д., Лопухин А. А., Пономаренко В. П., Филачев А. М., Бородин Д. В., Осипов Ю. В., Карпов В. В., Крошин А. М. Низкофоновое субматричное ФПУ формата 288×32 на основе InSb с цифровым режимом ВЗН // Там же. 2007. № 2. С. 61.
38. Триболе Ф., Дестенфанис Ж. Большие смотрящие КРТ-матрицы компании "Софрадир" // Там же. С. 54.
39. Zandian M., Scott D., Garnett J., Edwall D. D., Pasko J., Farris M., Daraselia M., Arias J. M., Bajaj J., Hall D. N. B., Jacobson S., Luppino G., Parker S. Ten-inch Molecular Beam Epitaxy Production System for HgCdTe Growth//Journ. Electron. Mater. 2005. V. 34. No. 6. P. 891.
40. Schooley M. G., Mei E. Low Cost 3D Vision for Autonomous Vehicles // Proc. SPIE. 2003. V. 5074. P. 28.
41. Demiguel S. Theoretical analysis and comparison of SWIR active imaging detectors//Ibid. 2009. V. 7298. P.729836(1)–7298236(10).
42. Reine M. B., Marciniak J. W., Wong K. K., Parodos T., Mullarkey J. D., Lamarre P. A., Tobin S. P., Minich R. W., Gustavsen K. A., Compton M., Williams G. M. Characterization of HgCdTe MWIR Back-Illuminated Electron-Initiated Avalanche Photodiodes // Journ. Electron. Mater. 2008. V. 37. No. 9. P. 1377.
43. Derelle S., Bernhardt S., Haidar R., Primot J., Deschamps J., Rothman J., Perrais G. A Monte Carlo study of multiplication and noise in HgCdTe avalanche photodiodes//Proc. SPIE. 2008. V. 7003. P. 70031P(1)—70031P(11).
44. Beck Woodall M., Scritchfield R., Ohlson M., Wood L., Mitra P., Robinson J. Gated IR Imaging with 128×128 HgCdTe Electron Avalanche Photodiode FPA//Journ. Electron. Mater. 2008. V. 37. No. 9. P. 1335.
45. Kinch M. A Theoretical Model for the HgCdTe Electron Avalanche Photodiode//Ibid. P. 1453.
46. Guellec F., Tchagaspian M., de Borniol E., Castelein P., Perez A., Rothman J. Advanced pixel design for infrared LADAR imaging//Proc. SPIE. 2008. V. 6940. P. 69402M(1)—69402M(10).
47. Pistone F., Tribolet P., Lefoul X., Zecri M., Courtas S., Jenouvrier P. New High Gain Detector for Active Imaging // Ibid. 2009. V. 7298. P. 729834(1)—7298234(10).
48. Филачев А. М., Пономаренко В. П., Таубкин И. И., Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Горелик Л. И., Кравченко Н. В., Кульманов А. В., Куликов К. М., Ложников В. Е., Шаронов Ю. П. Фотоприемники и фотоприемные устройства для приема импульсного излучения в спектральном диапазоне 0,3—11 мкм // Прикладная физика. 2002. № 6. С. 52.
49. Горелик Л. И., Кравченко Н. В., Куликов К. М., Трошкин Ю. С. Применение фоторезисторов на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ для приема импульсного излучения CO_2 -лазера//Там же. 1999. № 3. С. 54.

Current state and new prospects of the semiconductor infrared photoelectronics (Part 1^{*})

*M. D. Korneeva*¹, *V. P. Ponomarenko*^{1,2}, *A. M. Filachev*^{1,2}

¹Orion R&P Association, 9 Kosinskaya str., Moscow, 111402, Russia

²MIPT, 9 Institute al., Dolgoprudny, 141700, Russia

The paper shows condition and results of development in a number of basic technologies of infrared photoelectronics: semiconductor photosensitive materials, solid-state photo converters for IR and UV regions of the electromagnetic radiation, multispectral and fast response devices, THz radiation recording devices, metamaterials and nanotechnology for creation of new types of optoelectronic devices.

PACS: 85.60.-q

Keywords: photoelectronics, thermal vision, multispectral, InSb, solid solution, detectivity, array, fast-acting.

Bibliography — 49 references.

Received November 22, 2010

^{*} Part 2 — 2011. No. 3.