

УДК 621.383

Фотоэлектроника для нового поколения оптико-электронной аппаратуры

В. П. Пономаренко, А. М. Филачев

Государственное унитарное предприятие «НПО «Орион»», Москва, Россия

Рассмотрены результаты последних разработок технологий фотоприемников и фотоприемных устройств, в том числе многоэлементных и матричных, ИК-диапазона спектра. Наибольшее развитие получили технологии фотоприемников на основе фотодиодов из теллурида кадмия—ртути для тепловизионной аппаратуры, работающей в режиме временной задержки и накопления (2×256 , 4×288) либо в «смотрящем» режиме (384×288), а также на основе фотодиодов из антимонида индия. Активно развиваются технологии создания быстродействующих фотоприемных устройств для регистрации импульсного излучения в широком интервале длин волн от 0,3 до 11 мкм для задач лазерной локации и метрологии. Проведен анализ современного состояния фотоэлектроники и рассмотрены основные физико-технологические проблемы создания фоточувствительных материалов, элементов, систем охлаждения и обработки изображений.

ИК-системы, построенные на основе различных фотоприемных устройств, могут использоваться для решения целого ряда задач гражданского или военного назначения. Сюда относятся круглосуточная навигация транспортных средств, контроль промышленных процессов, глобальный мониторинг суши и океана в интересах экологической безопасности, системы переднего обзора (FLIR) авиации и сухопутных объектов, системы захвата целей (TAS), системы поиска и сопровождения различных целей (IRST) и многие другие.

Конфигурация ИК-систем для гражданских применений более или менее стандартна. Обычно она объединяет несколько компонентов, соединенных в единую конструкцию, обеспечивающую визуализацию ИК-изображения наблюдаемых объектов на телевизионном мониторе.

В военной технике, напротив, конфигурации ИК-систем весьма различны и зависят от применений. В последнее время в области военного использования стали различать примерно пять основных конфигураций, куда включают: системы переднего обзора, тепловые головки самонаведения ракет, системы поиска и сопровождения целей, системы захвата целей, космические системы и некоторые специальные системы. Строгую границу между ними в ряде случаев провести трудно.

Из анализа публикуемых в литературе данных [1—3] следует, что в общем количестве ИК-систем военного назначения около 40 % занимают системы переднего обзора, на основе которых строится большинство обзорно-навигационных и обзорно-прицельных систем военно-воздушной, военно-морской и сухопутной техники (рис. 1, а).

Конфигурацию, аналогичную военным системам переднего обзора, имеет и большинство гражданских систем, среди которых: системы промышленного контроля, тепловизионные приборы для вождения судов и других транспортных средств в ночное время суток и при ограниченной видимости, полицейские приборы, приборы для пожарных служб, охранные системы (рис. 1, б).

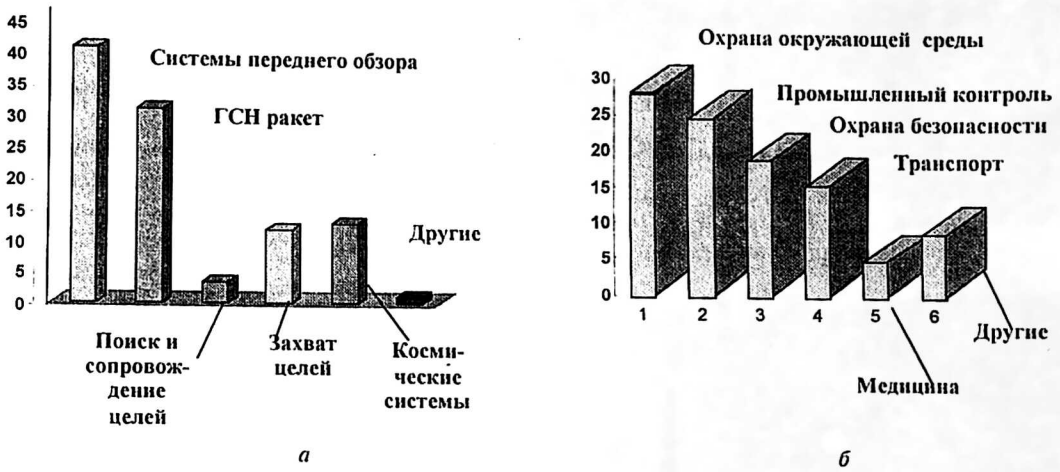


Рис. 1. Относительное распределение (%) ИК-систем различного назначения в военной (а) и гражданской (б) сферах

Таким образом, устройства, преобразующие ИК-излучение наблюдаемых объектов в видимое излучение в реальном масштабе времени при скорости смены информации (или частоте кадров), сравнимой с применяемой в телевидении, преобладают как в сфере гражданских, так и военных применений. Второе место по распространенности занимают ИК-системы тепловых головок самонаведения (ИК ГСН), работающие на принципах тепlopеленгации.

Среди полупроводниковых материалов, используемых для изготовления фотоприемников, по-прежнему основными остаются примерно девять полупроводников: Si, Ge, PbS, PbSe, InSb, InAs, InGaAs, AlGaAs, CdHgTe, а также фоточувствительные структуры на основе барьеров Шоттки в PtSi и микроболометров. Удельный вес этих материалов в полупроводниковой фотоэлектронике также различен. Здесь уже длительное время выделяются три «основных» материала (рис. 2).

- 1 — CdHgTe,
- 2 — PbS, PbSe,
- 3 — InSb,
- 4 — PtSi,
- 5 — Si; X,
- 6 — Ge,
- 7 — InAs, AlGaAs,
- 8 — другие

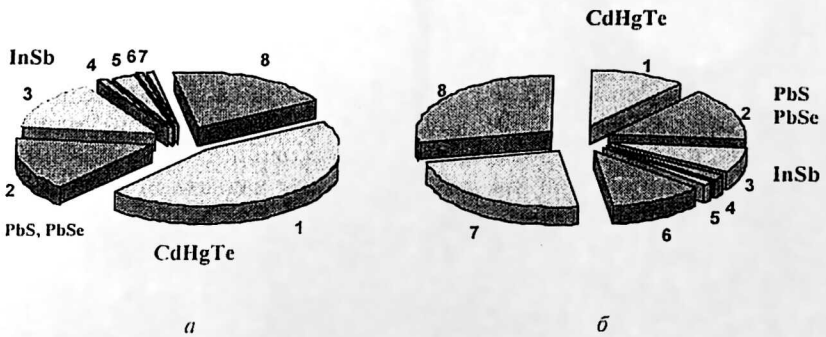


Рис. 2. Относительная доля различных материалов в полупроводниковой фотоэлектронике: а — военные применения; б — гражданский сектор

В области военных применений главенствующая роль принадлежит твердым растворам теллуридов кадмия—ртути (КРТ), на основе которых изготавливается около 50 % всех фотоприемников для тепловидения на область спектра 8—12 мкм.

Второе место занимают халькогениды свинца, с использованием которых выпускаются фотоприемники для головок самонаведения. Далее следует антимонид индия, достаточно широко применяемый для ИК-систем на область спектра 3—5 мкм. На долю приемников из силицида платины, кремния, германия, соединений на основе арсенида индия приходится 1—3 % от общего количества приборов. Область “другие приемники” включает ФП и ФПУ УФ-диапазона, приборы на основе квантоворазмерных эффектов, микроболлометры; она динамично расширяется, увеличиваясь приблизительно на 1,5—2 % в год.

Иная картина в области гражданских применений. Здесь доминируют сравнительно недорогие приборы на основе халькогенидов свинца, соединений InAs, микроболлометров, а доля приборов из КРТ составляет примерно 12 %.

В последние два года в объединении проводился ряд научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на исследование и разработку технологий приемников на основе практически всех вышеперечисленных материалов.

Основные усилия были сосредоточены на создании фотоприемных устройств для тепловидения нового поколения.

Как выглядит тепловизионная система нового поколения и, соответственно, что следует понимать под фотозлектронным модулем для такой тепловизионной системы рассмотрим ниже.

Фотозлектронные модули для тепловидения

Бурное развитие технологии фоточувствительных материалов и приемников на их основе привело во второй половине прошлого столетия к созданию семейства унифицированных полупроводниковых фотоприемных устройств для различных применений. В области тепловидения к ним относятся линейчатые или двухрядные ФПУ из CdHgTe для диапазонов спектра 3—5 и 8—14 мкм с числом элементов 10, 20, 60(64), 120(128), 180(192), из антимонида индия с числом элементов 48—64 и более и некоторые другие [4]. Тогда же был сформулирован и модульный принцип построения сканирующих тепловизионных систем на основе таких ФПУ, куда включают модуль объектива, модуль разворачивающего устройства, фотозлектронный модуль фотоприемного устройства, микроэлектронные модули управления, контроля, формирования TV-изображения и модуль вторичных источников питания (рис. 3).

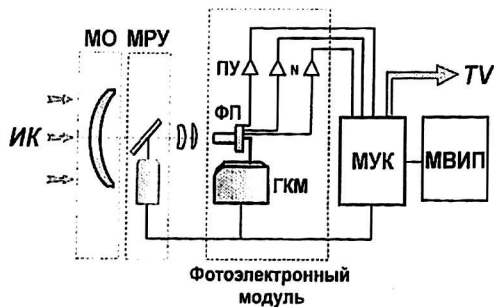


Рис. 3. Функциональная схема ТВП первого поколения на основе линейчатого ФПУ:

- МО — модуль входного объектива;
- МРУ — модуль разворачивающего устройства;
- МУК — модуль управления, контроля, формирования TV-изображения;
- МВИП — модуль вторичных источников питания;
- ПУ — блок многоканальных низкочастотных предусилителей;
- ГКМ — газокриогенная машина;
- ФП — многоэлементный фотоприемник

При указанной конфигурации тепловизионной системы фотозлектронный модуль включает ИК-фотоприемник в вакуумной или газонаполненной конструкции, микрокриогенную систему охлаждения и блок предварительных усилителей фотосигналов.

Модульный принцип построения с успехом применялся за рубежом и позволил заметно снизить затраты на разработку и организацию серийного производства тепловизионной аппаратуры первого поколения.

В настоящее время приоритеты в области создания тепловизионной техники существенно изменились. В связи с появлением в промышленности нового поколения фотоприемных устройств, прежде всего матричных и субматричных на основе CdHgTe , InSb , микроболометров [5], началось активное освоение тепловизионных приборов второго поколения со значительно улучшенными чувствительностью и пространственным разрешением. В основном это достигается за счет использования режима временной задержки и накопления (ВЗН), уменьшения размеров фоточувствительных элементов, увеличения емкости накопительных элементов, применения двухспектральных фоточувствительных элементов (как правило, 3—5 и 8—12 мкм) и т. п. Однако успешное применение матриц, реализация их преимуществ требует и учета особенностей матричных приемников при конструировании аппаратуры.

Эти особенности вытекают из совершенно новой организации узла фоточувствительных элементов в матричных приемниках по сравнению с малоэлементными или линейчатыми приборами первого поколения.

На рис. 4 показан узел ФЧЭ приемника на область спектра 8—12 мкм на основе ВЗН-матрицы из КРТ или антимонида индия формата 4×288, разработка которых ведется в НПО "Орион".

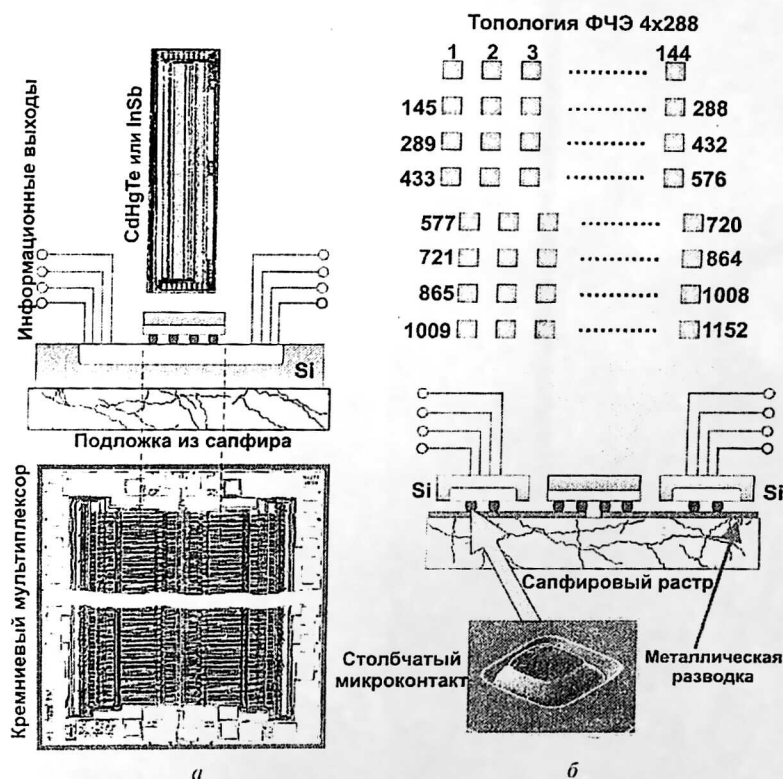


Рис. 4. Структура узла ФЧЭ субматричного фотоприемника из КРТ или антимонида индия формата 4×288:

а — матрица КРТ пристыкована индиевыми микроконтактами непосредственно на кремниевый мультиплексор; б — стыковка через промежуточный растр

В отличие от приборов первого поколения в таком фотоприемнике с числом элементов 1152 функции предварительной обработки фотосигналов, например мультиплексирование, осуществляются кремниевой микросхемой непосредственно в “холодной” зоне расположения ФЧЭ. Сформированные последовательности этих фотосигналов выводятся наружу по восьми информационным каналам. Структура кремниевых мультиплексоров может быть разной. Например, на рис. 4, а показан интегральный вариант, в котором матрица ФЧЭ с помощью индиевых микроконтактов состыкована непосредственно с Si-мультиплексором. Для приемника формата 2х256 возможна стыковка через промежуточный сапфировый растр (рис. 4, б).

Мы будем исходить из понятия модуля как некой самостоятельной части тепловизионной системы, но максимально унифицированной для использования в различных системах, отличающихся конструкцией, параметрами сканирования, функциональным назначением.

Применение многорядных ВЗН-матриц с числом линеек > 2 подразумевает выполнение функций временной задержки и накопления фотосигналов. При этом выполняется пространственное совмещение четных и нечетных строк линеек, а следующей операцией является суммирование сигналов от соседних (по вертикали) элементов. Обе операции осуществляются устройством цифровой обработки после соответствующего аналого-цифрового преобразования последовательности фотосигналов с информационных выходов в цифровой код. Таким образом, в составе фотоэлектронного модуля второго поколения неизбежно появляется submodule цифровой обработки (МЦО). Естественно, что перед этим сигнал должен быть усилен и преобразован в цифровой код, поэтому в составе фотоэлектронного модуля должен присутствовать submodule аналоговой обработки (МАО), где, кроме того, осуществляются функции формирования импульсов управления и питания приемника.

Помимо функций ВЗН submodule цифровой обработки должен выполнять ряд других функций: компенсацию постоянной составляющей фотосигналов, компенсацию разброса вольтовой чувствительности, интерполяцию или замену отсчетов “неработающих” элементов, формирование прицельной марки, кодирование изображения в условные цвета и т. п. Здесь же решается задача двухточечной коррекции по определению коэффициентов компенсации постоянной составляющей по результатам калибровки от “горячего” и “холодного” калибровочных источников излучения (АЧТ₁ и АЧТ₂).

С учетом сказанного структура тепловизионного канала с фотоэлектронным модулем второго поколения приведена на рис. 5.

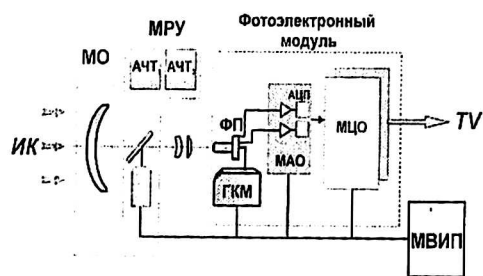


Рис. 5. Функциональная схема ТВП второго поколения на основе субматричного фотоприемника:

- МО — модуль входного объектива;
- МРУ — модуль развертывающего устройства;
- МВИП — модуль вторичных источников питания;
- МЦО — submodule цифровой обработки;
- МАО — submodule аналоговой обработки;
- АЦП — аналого-цифровые преобразователи;
- АЧТ_{1,2} — калибровочные АЧТ;
- ГКМ — газокриогенная машина

Выходной сигнал в телевизионном формате здесь формируется submodule цифровой обработки. Переход от одной тепловизионной системы к другой осуществляется простым перепрограммированием submodule цифровой обработки. Следовательно, именно такая конфигурация фотоэлектронного модуля

наиболее полно отвечает требованиям модульности. Главное отличие от систем первого поколения на основе одноэлементных или линейчатых приемников состоит в том, что формирование телевизионного сигнала для видеоконтрольного устройства реализуется здесь самим фотоэлектронным модулем.

Безусловно, состав и требования к submodule приемника, аналоговой и цифровой обработки (ФП, МАО, МЦО) могут и должны уточняться. Например, известно, что уже реализована конфигурация мультиплексора, где аналого-цифровое преобразование фотосигналов с каждого фоточувствительного элемента, а также суммирование осуществляются непосредственно в "холодной" зоне [6].

Структура фотоэлектронного модуля на основе "смотрящих" матриц мало отличается от вышеописанной. В тепловизионном канале "смотрящего" типа отсутствует модуль развертывающего устройства (МРУ). Функции submodule аналоговой и цифровой обработки те же, за исключением временной задержки и накопления.

На рис. 6 показан узел фоточувствительных элементов приемника на основе "смотрящей" матрицы из КРТ формата 384×288, разработка которого ведется в НПО "Орион".

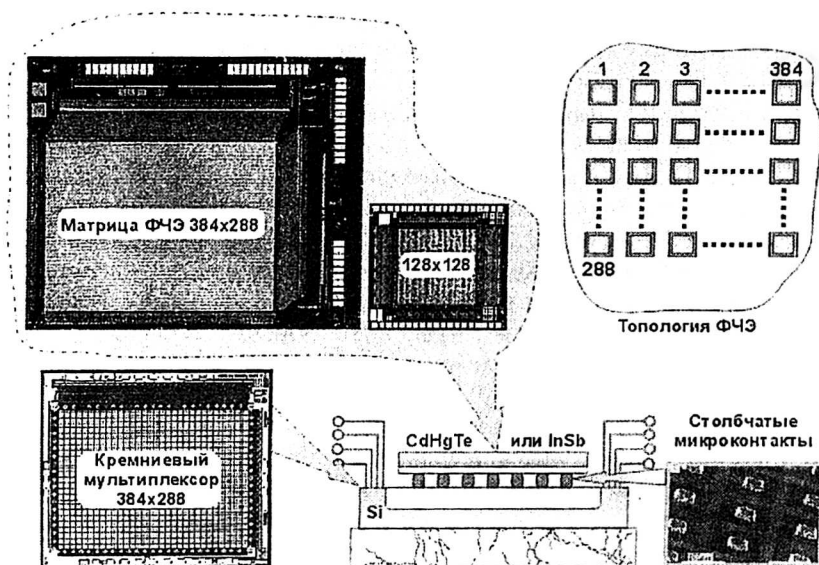


Рис. 6. Структура узла ФЧЭ матричного фотоприемника из КРТ формата 384×288

Здесь матрица фотодиодов с $p-n$ -переходами и числом элементов более 110000 из $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x \approx 0,2$) состыкована посредством индиевых микроконтактов непосредственно с кремниевым мультиплексором, построенным на основе МОП-транзисторов по КМОП-технологии. Число информационных выходов, выводящих последовательности фотосигналов в submodule аналоговой и цифровой обработки, равно 4.

Для матриц форматов 2×96, 2×256, 128×128, 384×288 из КРТ и антимонида индия нами разработана единая базовая конструкция, пригодная для стыковки с газокриогенными машинами Стирлинга на "азотный" уровень температур (рис. 7). Те же фоточувствительные элементы могут размещаться непосредственно на охлаждаемом пальце микроохладителя Стирлинга интегрального типа. Для приемника формата 2×96 разработана специальная кон-

струкция, работающая с микроохладителем Джоуля-Томсона “брызгающего” типа с временем выхода на “азотный” уровень температур < 10 с. Все конструкции построены на основе металлокерамических узлов, имеют низкие теплопритоки и прошли достаточно жесткие механические, климатические и другие испытания.

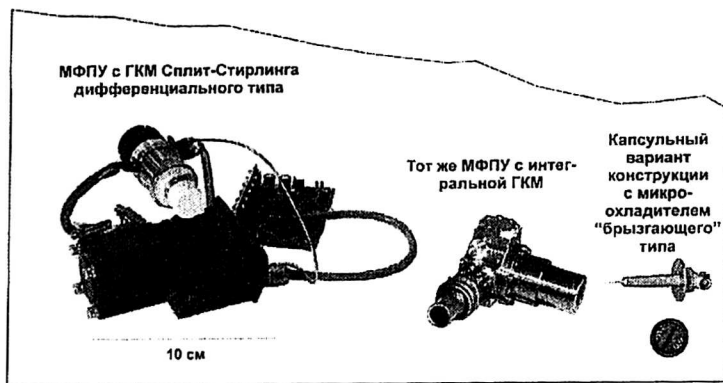


Рис. 7. Базовые конструкции матричных фотоприемников на основе $CdHgTe$ и $InSb$

Одновременно в объединении были продолжены работы по разработке технологии изготовления неохлаждаемых (тепловых) матриц на основе болометрического эффекта. В качестве первого шага для отработки технологии нами был выбран приемник формата 64×64 с дальнейшим переходом к форматам 120×160 и 320×240 .

Известен достаточно широкий спектр температурно-чувствительных материалов, перспективных для изготовления микроболометрических фоточувствительных элементов: оксиды ванадия, аморфный и монокристаллический кремний и др. В последнем случае процесс изготовления приемника полностью базируется на кремниевых микроэлектронных технологиях, без привлечения других материалов, характерных для фотоэлектроники на основе КРТ, антимонида индия и т. п. Пока проводимые в НПО “Орион” разработки базируются на использовании в качестве термочувствительного материала оксида ванадия (VO_x). Кремниевая схема считывания и мультиплексирования фотосигналов строилась на основе ключей биполярных *pnp*-транзисторов и *n*-канальных МДП-мультиплексоров. На рис. 8 показаны микрофотографии узла фоточувствительных элементов такого фотоприемника.

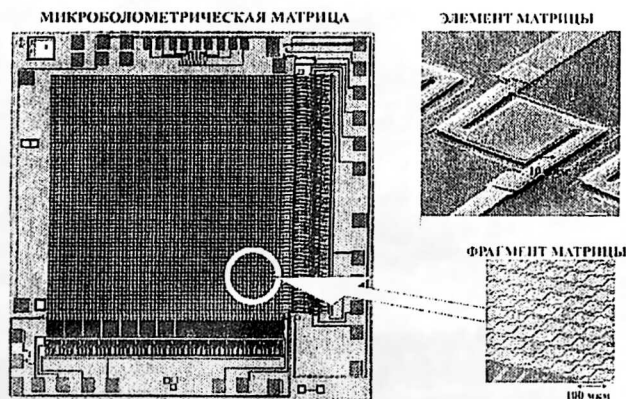


Рис. 8. Узел ФЧЭ микроболометрической матрицы формата 64×64

Полученное значение эквивалентной разности температур (NETD) равно 0,5 К.

В 80-х годах создание приборов с внутренним накоплением фотосигналов (ВНС) признавалось как одно из самых перспективных направлений развития КРТ-технологий. В основе создания таких структур лежат фоторезистивные технологии. Известно, что при достаточно больших временах жизни электронов в материале КРТ *n*-типа (> 2 мкс) при скорости сканирования изображения ~ 100 м/с в таких приборах можно получить значения обнаружительной способности $> 10^{11}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹. Направление не утратило актуальности и в настоящее время, в том числе с появлением ВЗН-матриц, где накопление фотосигналов организовано по-иному и происходит вне чувствительных элементов, прежде всего при создании многоцветных приемников, одновременно регистрирующих фотосигнал в двух спектральных диапазонах 3–5 и 8–14 мкм.

На рис. 9 показана структура узла фоточувствительных элементов двухцветного фотоприемника с внутренним накоплением фотосигналов, первый этап разработки которого завершен в НПО "Орион".

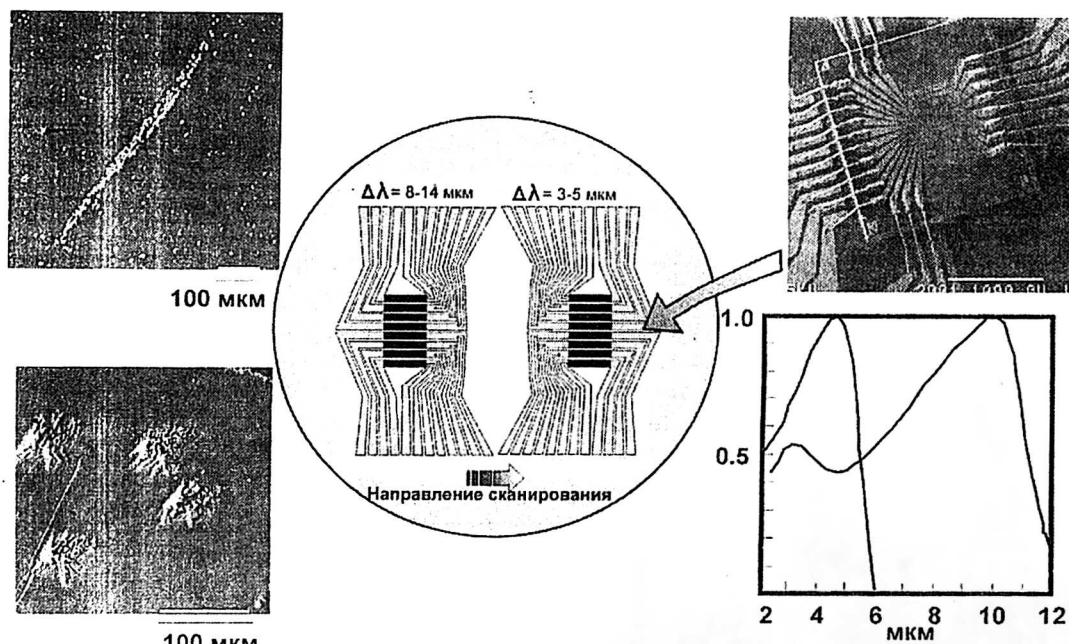


Рис. 9. Структура узла ФЧЭ двухцветного фотоприемника с внутренним накоплением фотосигналов на основе КРТ

За время одного скана в направлении оси *X* изображение последовательно проходит сначала 8-площадочную линейку элементов с внутренним накоплением из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x \approx 0,2$ для области спектра 8–14 мкм, а затем в течение того же скана, симметричную линейку из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x \approx 0,3$ для области спектра 3–5 мкм. Информационные выходы приемника разделены так, что можно наблюдать тепловизионное изображение отдельно либо в диапазоне 8–14 мкм, либо в диапазоне 3–5 мкм, либо организуя их суперпозицию. Для изготовления блока ФЧЭ на область спектра 8–14 мкм нами были впервые использованы эпитаксиальные слои КРТ *n*-типа, выращенные методом

молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs с варизонными слоями в качестве пассивирующего диэлектрика. Для большинства элементов полученные значения D^* составляют $(2-3) \cdot 10^{11}$ см \cdot Гц $^{1/2}$ \cdot Вт $^{-1}$. При этом наблюдается отчетливая взаимосвязь этого параметра со структурным совершенством поверхности образцов, где могут присутствовать структурные дефекты, вид которых также показан на рис. 9.

Разработка крупноформатных матриц, организация промышленного выпуска приборов требуют серийного материала с достаточно большим размером образцов (5—7 см), необходимым набором электрофизических параметров, высоким структурным совершенством и геометрией поверхности. Жидкофазная эпитаксия КРТ, развиваемая в Гиредмете, дает достаточно высокие параметры образцов, и после организации серийного производства материала вполне обеспечит промышленный выпуск матриц типа 2×256, 4×288, 384×288. Для более крупноформатных матриц необходима серьезная доработка оборудования и технологии. Здесь помимо жидкофазной необходимо развивать как молекулярно-лучевую, так и МОС-гидридную эпитаксии. Для матриц на основе антимонида индия крайне необходимы эпитаксиальные слои n -типа на подложках из прозрачного в области 3—5 мкм материала. В последнем случае технологии изготовления матричных приемников из CdHgTe и InSb становятся достаточно похожими и требуют практически одного и того же комплекта технологического оборудования.

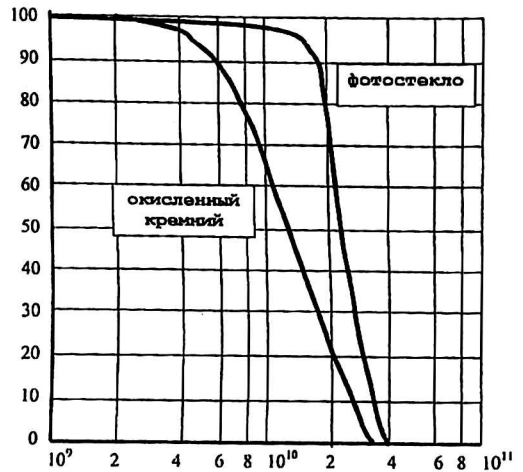
Фотоэлектронные модули на основе халькогенидов свинца

Фотоэлектроника с использованием поликристаллических слоев сульфида и селенида свинца (PbS, PbSe) по объемам и значимости по-прежнему играет заметную роль в инфракрасной технике различного назначения. Это обусловлено и достаточной отработанностью технологии, и сравнительно низкой стоимостью таких приборов. В объединении это приборно-технологическое направление относится к числу старейших и получило развитие еще в 50-е годы. За это время было разработано и принято свыше сотни различных приборов от одно- и малоэлементных до фотоприемных устройств, содержащих более 3000 чувствительных элементов, исследованы и поняты основные механизмы фотопроводимости, инерционности, формирования длинноволновой границы чувствительности и т. п.

В последние два года были продолжены работы по созданию методов *управляемого синтеза* пленок PbS и PbSe с помощью технологических факторов. Было показано, что распределение и плотность центров зародышеобразования кристаллитов, формирующих пленки, полностью определяются материалом подложки, предростовой обработкой ее поверхности и некоторыми другими факторами. В результате исследования этих механизмов удалось разработать технологию выращивания поликристаллических слоев халькогенидов свинца на различных подложках, в том числе на поверхности окисленного кремния.

На рис. 10 показано распределение, %, доли чувствительных элементов на основе пленок из PbSe, имеющих измеренное значение $D_{\lambda_{\max}}^*$ больше некоторого заданного, выращенных на специально обработанных подложках из фотостекла и на поверхности окисленного кремния.

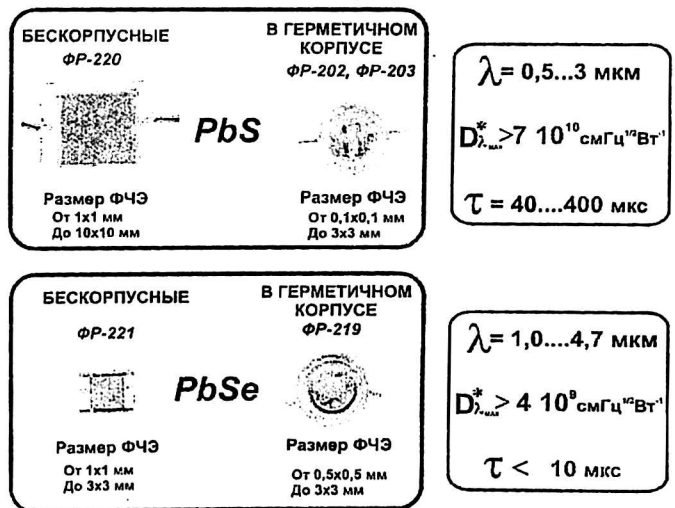
Рис. 10. Распределение, %, доли ФЧЭ, имеющих значение $D_{\lambda_{\max}}^*$ больше некоторого заданного, для элементов из PbSe, выращенных на подложках из фотостекла и на поверхности окисленного кремния



Видно, что для $D_{\lambda_{\max}}^* \cong 2 \cdot 10^9$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹ результаты практически одинаковы, а при $D_{\lambda_{\max}}^* \cong 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹ результаты, полученные на поверхности SiO₂, пока примерно в полтора раза хуже. Дальнейшая отработка технологии должна позволить получить слои PbS и PbSe со свойствами, обеспечивающими изготовление многоэлементных приемников с высокими параметрами. В этом случае станет реальной перспектива создания нового класса монолитных фотоприемных устройств для областей спектра 1—3 и 3—5 мкм, содержащих в плоскости ФЧЭ не только чувствительные элементы, но и схемы электронной обработки фотосигналов, прежде всего матричных.

С учетом многих применений приемников из халькогенидов свинца (тепловой контроль, противопожарные системы, задачи экологии и т. п.) в объединении завершена разработка типоразмерного ряда неохлаждаемых приборов из PbS и PbSe, в том числе бескорпусных или в стандартных конструкциях, с выпуском соответствующей технологической и конструкторской документации, что позволяет максимально быстро “подстроиться” под требования заказчика. Результаты этих работ представлены на рис. 11, где показаны основные типоразмеры и параметры приборов, которые могут поставляться объединением. Сейчас заканчивается аналогичная работа по линейчатым приемникам, в том числе охлаждаемым ТЭО, с числом элементов 48, 64, 128, 256.

Рис. 11. Типоразмерный ряд неохлаждаемых фоторезисторов на основе PbS и PbSe, разработанный в НПО “Орион”



Фотоэлектроника для регистрации быстропротекающих процессов

Это направление развивается в объединении с использованием целого ряда полупроводников и полупроводниковых соединений.

Для диапазона от 0,4 до 1,7 мкм в основном используются фотодиоды на основе кремния ($\lambda = 0,4-1,06$ мкм), германия ($\lambda = 0,9-1,6$ мкм), а также фотодиоды на основе соединений InGaPAs ($\lambda = 1,1-1,7$ мкм), содержащие *p-n*-переходы или со структурой *p-i-n*. Обычно они находят применение для регистрации когерентного или спонтанного излучения в системах лазерной дальнометрии, волоконно-оптических линиях связи и т. п.

К настоящему времени в объединении разработан ряд серийных технологий, позволяющих выпускать фотодиоды для приема лазерного излучения на длинах волн 0,85, 1,06 и 1,54 мкм, в том числе большой площади, снабженных специально разработанной микроэлектроникой усиления, квазиоптимальной фильтрации, нормирования фотосигналов и т. д. Приборы позволяют регистрировать импульсное излучение с амплитудой $10^{-8}-10^{-9}$ Вт и длительностью $< 10^{-8}$ с. Использование разработанных в объединении технологий на основе широкозонных соединений, таких как GaP, GaPAs, GaAs, дает возможность изготовить приемники для диапазона от ультрафиолетового до видимого, в том числе для регистрации импульсного излучения с длительностью менее 10 нс.

Особый интерес представляет направление по приборам для регистрации излучения на длине волны 10,6 мкм (излучение CO₂-лазера). Технологии таких приборов основаны на использовании фоторезисторов или фотодиодов из КРТ. Например, применяя состав Cd_xHg_{1-x}Te при $x = 0,16-0,17$, удалось реализовать при комнатной температуре собственную инерционность фоторезистора менее 10^{-9} с, что делает такие неохлаждаемые приборы особенно перспективными при исследованиях временных и пространственных характеристик лазерного излучения. Применение гетеродинного режима в приемниках на основе фотодиодов из КРТ, первые работы по которым были начаты еще в 70-х годах, позволило реализовать порог на уровне $5 \cdot 10^{-20}$ Вт·Гц в полосе частот 600—1000 МГц, что равнозначно режиму счета единичных фотонов соответствующей энергии. Недавно было показано, что для фоторезисторов из КРТ в полосе до 100 МГц могут быть реализованы близкие пороги [7].

Заключение

С учетом происходящего в инфракрасной технике перехода к тепловизионным системам нового поколения проблемы создания матричных и субматричных приборов на основе КРТ, антимионида индия, микроболометров и др. будут центральными в ближайшей перспективе.

Смогут ли “смотрящие” матрицы в обозримом будущем вытеснить ВЗН-матрицы и обеспечить те же или лучшие параметры аппаратуры на их основе?

Время накопления, которое в “смотрящих” матрицах ограничено углом зрения на фон и емкостями накопления в ячейках мультиплексора, сейчас составляет $3 \cdot 10^7-10^8$ электронов. При увеличении этой емкости в 10—12 раз, например для матрицы формата 256×256, эквивалентная разность температур становится сравнимой с достигаемой в ВЗН-матрице формата (6—8)×256. Создание “смотрящих” матриц, где время накопления фотоносителей станет сравнимым с временем кадра — одна из наиболее важных проблем фотоэлек-

троники для тепловидения нового поколения. При этом должна обеспечиваться и высокая степень однородности изображения, которая пока для ВЗН-матриц из-за усреднения при сканировании несколько выше.

Большие перспективы заложены в квантоворазмерных структурах на основе различных полупроводников. Как показывают публикации последнего времени на их основе могут быть получены термоэлектрические охладители совершенно нового типа [8–10].

Со времени открытия эффекта Пельтье основные усилия направлялись на увеличение термоэлектрической добротности материалов (Z), определяющей максимально возможное снижение температур в охладителе Пельтье. Достигнутые для большинства материалов на основе теллуридов сурьмы и висмута значения параметра Z составляют величину порядка $(2,8-3,5) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ и обеспечивают снижение температуры на 120–140 К, что далеко от “азотного” уровня. При исследованиях квантоворазмерных явлений в сверхрешетках на основе некоторых полупроводников было обнаружено увеличение Z сразу в 6–8 раз. Если на основе эффекта переноса в квантоворазмерных структурах удастся создать термоэлектрический охладитель “азотного” уровня, то тепловизионный модуль будущего поколения может выглядеть как показано на рис. 12. Здесь фотоэлектронный модуль на основе “смотрящих” матриц помимо электроники обработки в “холодной” зоне содержит и submodule охлаждения и по сути реализует идею создания “самоохлаждающихся” тепловизионных матриц.

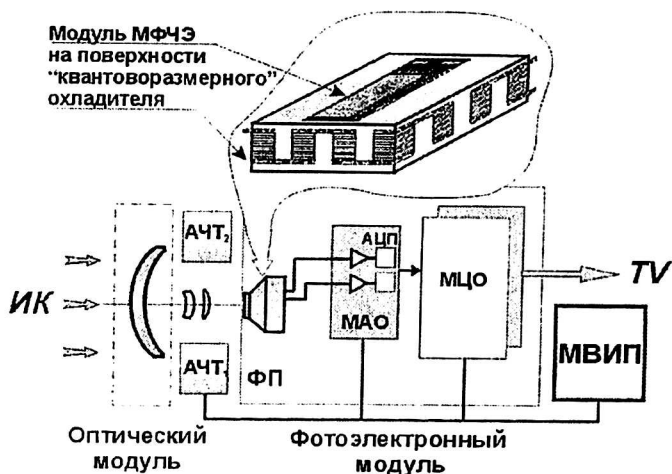


Рис. 12. Функциональная схема ТПВ следующего поколения с системой охлаждения на основе явлений переноса в квантоворазмерных структурах

Литература

1. Photonics Spectra, 2001. V. 35. № 4. P. 78–84.
2. Ibid. № 2. P. 70.
3. Proc. SPIE, 2001. V. 4130. P. 263–270.
4. Ibid. V. 1540. P. 412–423.
5. Ibid. V. 4369. P. 25–42.
6. Ibid. V. 4028. P. 137.
7. Russian Journ. Appl. Phys., 1999. V. 3. P. 47–54.
8. Appl. Phys. Lett., 2001. V. 78. № 1. P. 1580–1582.
9. Nature, 2001. V. 413. P. 597–602.
10. Холодильная техника, 1999. № 7. С. 12–14.

Photoelectronics for new generation of electron-optical equipment

V. P. Ponomarenko, A. M. Filachev

ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

Results of the latest developments of technologies of photodetectors and photodetective assemblies including multi-element and matrix ones for IR-spectral range were discussed. Technologies for photodetectors based on CMT photodiodes for thermal imaging equipment operating TDI mode (2×256, 4×288) or in a "staring" mode (384×288) as well as on the basis of photodiodes of indium antimonide received a large development effort. Technologies for manufacturing of high-speed photodetective assemblies for recording of pulse radiation in a wide interval of wavelengths from 0.3 to 11 μm for laser direction finding and metrology are actively developed. An analysis of up-to-date state of photoelectronics was carried out and main physics and technological problems of making photosensitive materials, photosensitive elements, cooling and image processing systems was observed.