

# Фотоэлектроника: элементная база и технология

УДК 621.383

## Современное состояние и новые направления полупроводниковой ИК-фотоэлектроники

### Часть 2\*

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 терагерцовой 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  $2 \times 96$ ,  $2 \times 256$ ,  $4 \times 288$ ,  $2 \times (2 \times 288)$ ,  $6 \times 576$ ,  $128 \times 128$ ,  $256 \times 256$ ,  $320 \times 256$ ,  $384 \times 288$  и других 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.

Во второй части статьи авторы завершают рассмотрение состояния отечественных разработок и исследований в вышеуказанных направлениях.

### Многоспектральные ФПУ для диапазонов 1—3, 3—5 и 8—12 мкм

Известно, что для обнаружения объекта оптимальным может быть один спектральный диапа-

зон, а для его идентификации на фоне естественных или организованных помех — другой [6]. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы (ОЭС) позволяют преодолеть эффект нулевого радиационного контраста, который приводит к принципиальной неразличимости целей однодиапазонным прибором. Они обеспечивают проведение радиометрических измерений, количественный анализ температурных градиентов сцены и т. п.

При построении таких ОЭС может применяться несколько подходов. Первый рассчитан на использование комплектов отдельных фотоприемных устройств для различных диапазонов. Это предполагает наличие специального спектроделительного устройства в составе ОЭС. Например, для работы в составе аппаратуры метеорологического космического мониторинга в НПО "Орион" разработан комплект из трех отдельных ФПУ в унифицированной конструкции для работы в области азотных температур с фотодиодами из КРТ форматов  $2 \times 96$ , где спектральные диапазоны формируются специальными оптическими фильтрами. Приемники работают в режиме ВЗН с накоплением по двум элементам в областях спектра 3,5—4; 5,7—9,2; 9,2—11,5 мкм.

Для второго варианта необходимо применение единого ФПУ (гибридного или монолитного), в фокальной плоскости которого размещены массивы фоточувствительных элементов, чувствительных в разных спектральных диапазонах. Для создания двухспектральных ФПУ в гибридном исполнении

Корнеева Марина Дамировна<sup>1</sup>, первый зам. генерального директора.

Пономаренко Владимир Павлович<sup>1,2</sup>, зам. генерального директора, профессор.

Филачёв Анатолий Михайлович<sup>1,2</sup>, генеральный директор, профессор.

<sup>1</sup>ФГУП «НПО "Орион"», ГНЦ РФ.

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

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

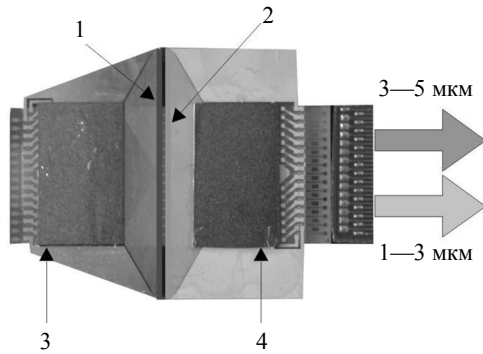
<sup>2</sup>Московский физико-технический институт.

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

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2010 г.

\* Часть 1 данной статьи опубликована в № 2 журнала за 2011 г. Нумерации рисунков, таблиц, список ссылок на источники являются продолжениями первой части (ссылки на [6, 14, 15, 20, 22, 33] см. ч. 1, № 2. 2011).

в объединении разработана технология стыковки фоторезисторов из халькогенидов свинца со специальными мультиплексорами, позволяющими выводить из рабочей зоны сигналы с линеек формата  $1 \times 256$  на основе PbS либо PbSe. Это позволяет объединять в единый узел блоки (рис. 15) многоэлементных фоторезисторных структур, в том числе и с кольцевым расположением фоточувствительных элементов малоразмерных фоторезисторов из PbS и PbSe для диапазонов 2,5—3,1 и 3,5—4,5 мкм с общим числом ФЧЭ, равным 6144.

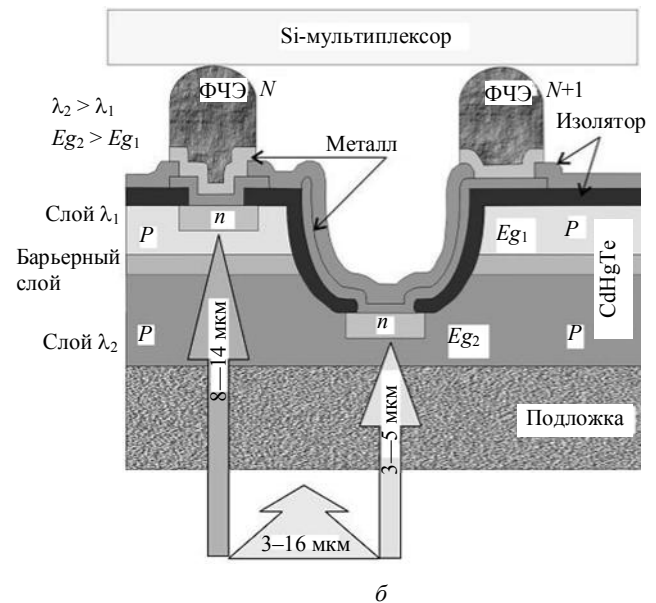
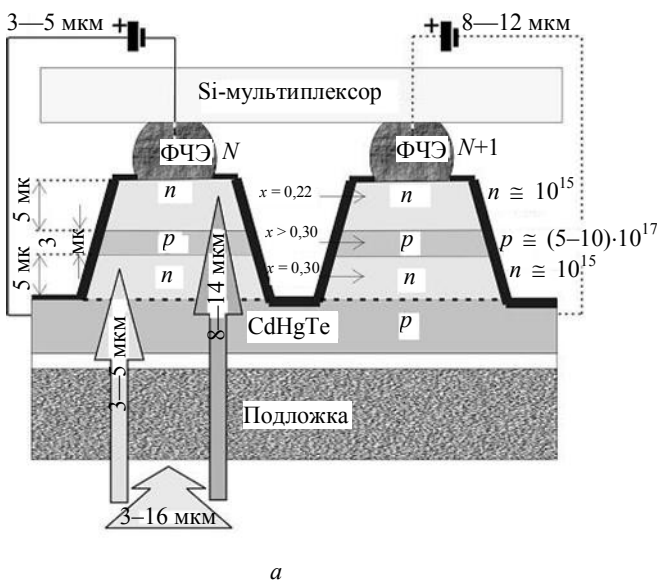


**Рис. 15. Единый узел блоков многоэлементных фоторезисторных структур:**  
 1 — линейка ФР из PbS  $1 \times 256$ ; 2 — линейка ФР из PbSe  $1 \times 256$ ; 3 — мультиплексор сигналов PbS; 4 — мультиплексор сигналов PbSe

Более перспективным является создание ФПУ, чувствительные элементы которых могут одно-

временно воспринимать фотосигналы из разных спектральных диапазонов (монокристаллы многоспектральные ФПУ). Обычно это достигается путем использования многослойных полупроводниковых структур (рис. 16), отдельные слои которых поглощают и генерируют фотосигналы при попадании ИК-излучения разного спектрального состава. В зависимости от устройства такой многослойной структуры фоточувствительные элементы делятся на два основных типа: меза- и псевдопланарные, позволяющие проводить одновременное или последовательное считывание фотосигналов из различных спектральных диапазонов [33, 50—54].

В НПО "Орион" для изготовления 2-диапазонного МФПУ формата  $2 \times (2 \times 288)$ , работающего в ВЗН-режиме в областях спектра 3—5 и 8—12 мкм, была разработана технология с использованием псевдопланарного варианта на основе структур ГЭС КРТ, содержащих слои состава  $X = 0,3$  ( $\Delta\lambda_1 = 3—5$  мкм) и  $X = 0,2$  ( $\Delta\lambda_2 = 8—12$  мкм). Конструкция узла ФЧЭ и фотография микроконтактов к чувствительным слоям представлены на рис. 17. Здесь для объединения матрицы фотодиодов с кремниевым мультиплексором использована специально разработанная технология "разновысоких" столбчатых контактов. Параметры фотоприемных устройств, разработанных в объединении и предназначенных для работы в составе многоспектральной аппаратуры, представлены в табл. 4.



**Рис. 16. Многослойные полупроводниковые структуры, отдельные слои которых поглощают и генерируют фотосигналы при попадании ИК-излучения разного спектрального состава:**  
 а — мезапланарная структура; б — псевдопланарная структура

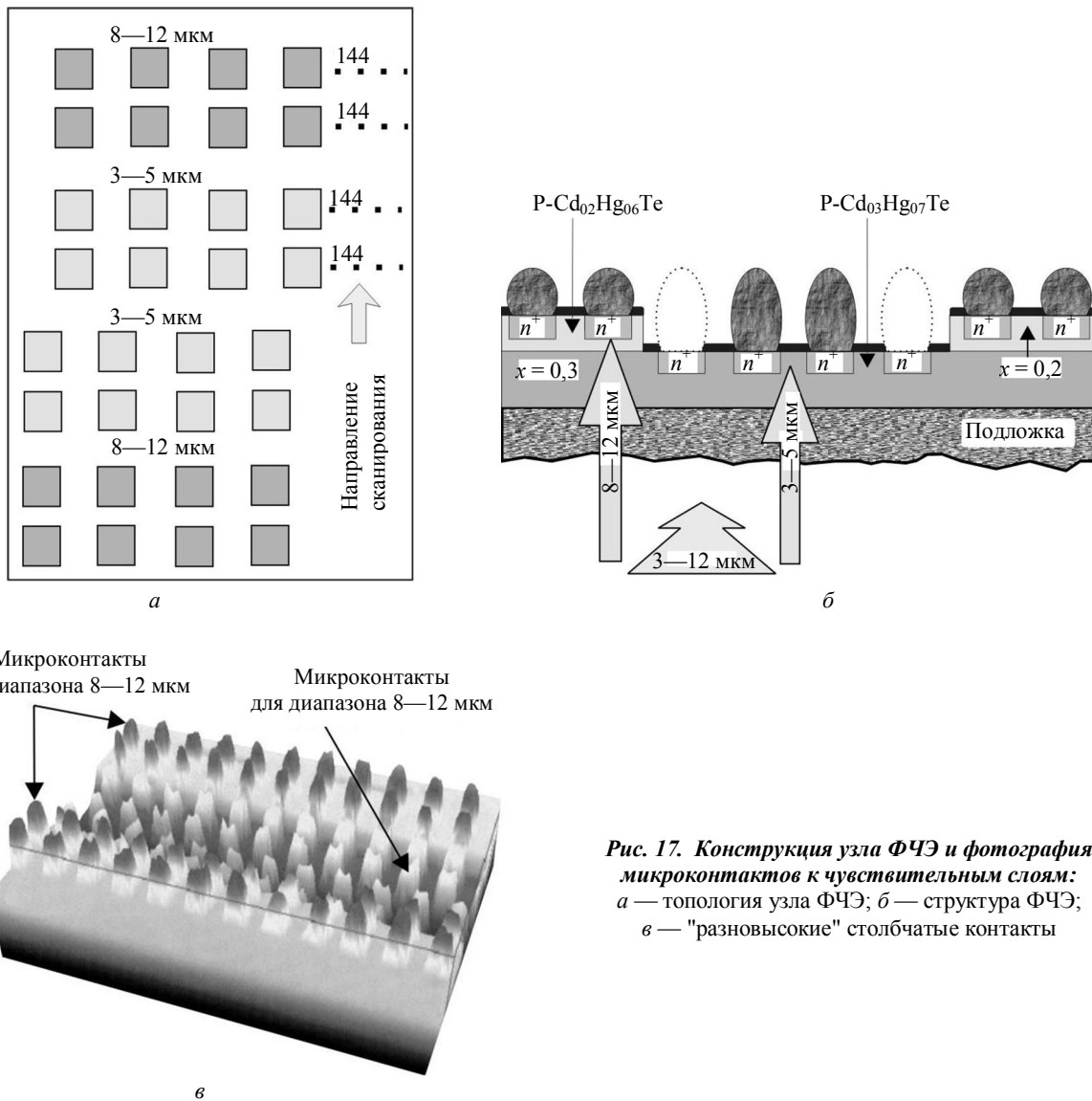


Рис. 17. Конструкция узла ФЧЭ и фотография микроконтактов к чувствительным слоям: а — топология узла ФЧЭ; б — структура ФЧЭ; в — "разновысокие" столбчатые контакты

Таблица 4

Многоспектральные фотоприемные устройства НПО "Орион"

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Норма	
			не менее	не более
<i>Комплект МФПУ формата 2×96 из CdHgTe для трех спектральных диапазонов</i>				
Коротковолновая граница: Тип МФПУ			3,5±0,2	
ГС-01	$\lambda_{кор}$	мкм	5,7±0,2	
ГС-02	по уровню 0,5		9,2±0,2	
ГС-03				
Длинноволновая граница:			4,0	—
ГС-01	$\lambda_{длин}$	мкм	9,2	—
ГС-02	по уровню 0,5		11,5	—
ГС-03				
Эффективный размер ФЧЭ	$a$	мкм	30	40
Среднее значение $D_{\lambda_m}^*$ в режиме ВЗН:			1·10 <sup>11</sup>	—
ГС-01	$D_{cp}^*$	см·Гц <sup>1/2</sup> ·Вт <sup>-1</sup>	7·10 <sup>10</sup>	—
ГС-02			5·10 <sup>10</sup>	—
ГС-03				
Количество каналов с $D_{\lambda_m}^* < 0,5 \cdot D_{cp}^*$	$N_1$	шт.	—	3
Вольтовая чувствительность	$S_u$	В·Вт <sup>-1</sup>	1·10 <sup>7</sup>	—
Неоднородность $S_u$	$\delta S_u$	%	—	30
Коэффициент фотоэлектрической связи	$K_{св}$	%	—	5
Рабочая температура	$T_{раб}$	К	77	80

Окончание табл. 4

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Норма	
			не менее	не более
<i>Гибридное двухспектральное ФПУ из PbS и PbSe формата 2×256</i>				
Диапазон спектральной чувствительности: Канал-1 (1×256) Канал-2 (1×256)	$\Delta\lambda_1$ $\Delta\lambda_2$	мкм мкм	2,6—3,2 3,5—4,5	
Эффективный размер ФЧЭ	$a \times b$	мкм	—	60×40
Обнаружительная способность: Канал-1 Канал-2	$D_{\lambda m}^*$	см·Гц <sup>1/2</sup> ·Вт <sup>-1</sup>	3·10 <sup>11</sup> 4·10 <sup>10</sup>	
Пороговый поток: Канал-1 ( $\lambda = 2,8$ мкм, 2 мс) Канал-2 ( $\lambda = 4,0$ мкм, 2 мс)	$P_{пор}$	Вт·эл <sup>-1</sup>		5·10 <sup>-13</sup> 3·10 <sup>-12</sup>
Постоянная времени: Канал-1 Канал-2	$\tau$	мкс		(2—5)·10 <sup>3</sup> 25—50
Период опроса	$t_{опр}$	мкс	250	—
Количество информационных выводов	$N_{инф}$	шт.	24	
Рабочая температура	$T_{раб}$	К	200—160	
<i>Монолитное МФПУ из CdHgTe на основе псевдопланарных структур формата 2×2×288</i>				
Диапазон спектральной чувствительности: Канал-1 Канал-2	$\Delta\lambda_1$ $\Delta\lambda_2$	мкм	3,0—7,1 7,1—10,4	—
Среднее значение $D_{\lambda m}^*$ в режиме ВЗН: Канал-1 Канал-2	$D_{ср}^*$	см·Гц <sup>1/2</sup> ·Вт <sup>-1</sup>	1,4·10 <sup>11</sup> 9,2·10 <sup>10</sup>	—
Вольтовая чувствительность в режиме ВЗН: Канал-1 Канал-2	$S_u$	В·Вт <sup>-1</sup>	2,1·10 <sup>8</sup> 3,7·10 <sup>7</sup>	
Динамический диапазон		дБ	60	

Повышение количества спектральных диапазонов, увеличивающее информативность ОЭС (для 2-диапазонной системы в 2<sup>2</sup> раз по сравнению с однодиапазонной), требует и оптимального синтеза получаемой информации в специальных блоках цифровой обработки сигналов (БЦО). Первичная задача, решаемая БЦО, — преодоление эффекта нулевого радиационного контраста, который приводит в принципиальной неразличимости объекта односпектральным прибором при любой его чувствительности.

К настоящему времени в объединении разработан ряд алгоритмов предварительной обработки и оптимального синтеза слабоконтрастных тепловизионных изображений для ОЭС, работающих в диапазонах 3—5 и 8—12 мкм [55]. На основе двух комплектов МФПУ из CdHgTe и InSb форматов 256×256 разработан тепловизионный модуль с блоком синтеза двухцветных изображений.

### ФПУ ультрафиолетового диапазона

Ультрафиолетовым излучением принято называть оптическое излучение с длинами волн в интервале  $\Delta\lambda = 0,01—0,38$  мкм ( $h\nu = 3,2—124$  эВ). Источником “естественного” ультрафиолета в земных условиях является Солнце (рис. 18).

Вследствие влияния атмосферы в области 0,2—0,28 мкм (коротковолновое УФ-излучение) сол-

нечный ультрафиолет практически не достигает поверхности Земли. В диапазоне 0,28—0,32 мкм (средневолновое УФ-излучение) спектральная плотность зависит от длины волны, на нее сильно влияет географическое положение, время года, наличие промышленных объектов и др. Длинноволновое УФ-излучение сосредоточено в интервале 0,32—0,38 мкм; здесь атмосфера пропускает порядка 15—40 % солнечного ультрафиолета [14, 22]. Канал с ФПУ ультрафиолетового диапазона все чаще используют в качестве дополнительного канала в многоспектральных ОЭС, что значительно повышает вероятность обнаружения воздушных и др. целей на фоне ложных помех. При малых углах подлета со стороны Солнца УФ-канал остается фактически единственным оптическим каналом, способным осуществить захват цели. В ряде публикаций указывается, что оптико-локационные системы с твердотельными ФПУ УФ-диапазона, работающими в режиме счета фотонов, могут обеспечить даже большие, чем системы с ИК-каналами, дальности обнаружения атакующих ракет по излучению факела работающего двигателя, где имеется заметная УФ-компонента [15]. Можно назвать и другие важнейшие области применения ФПУ ультрафиолетового диапазона спектра: противоракетные комплексы, подводные линии беспроводной оптической связи, астронавигация и др.

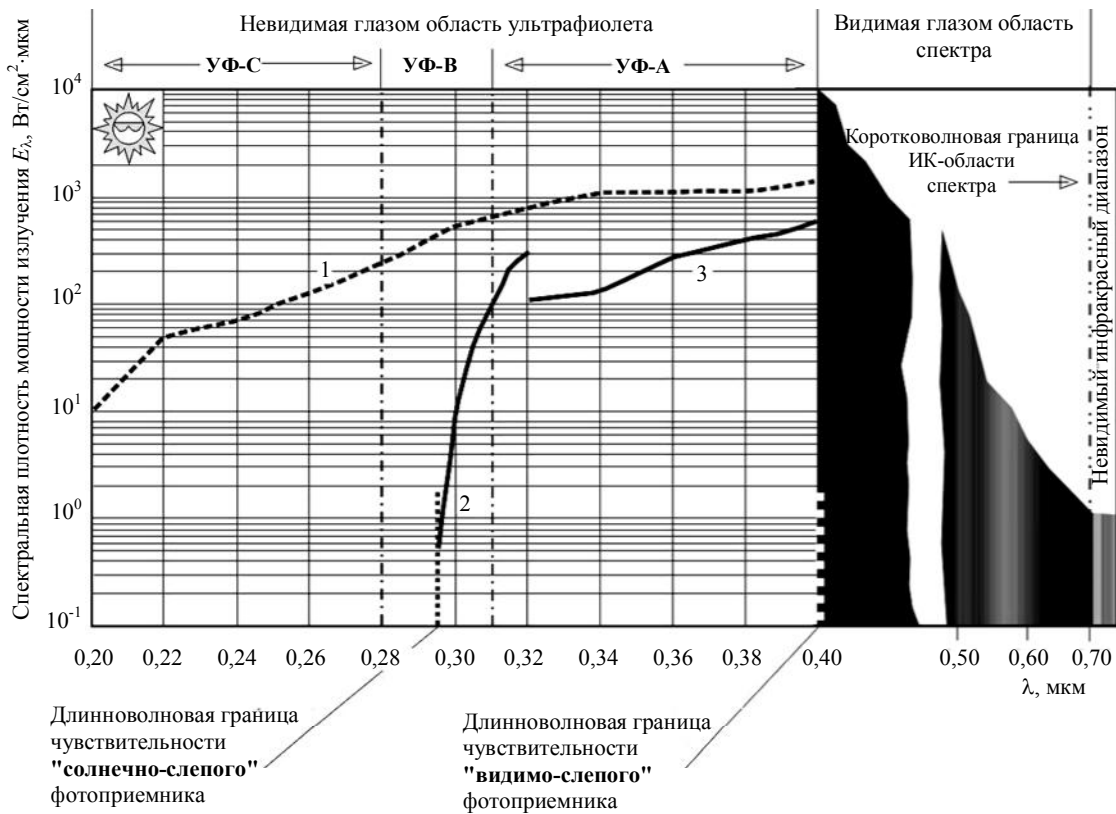


Рис. 18. Спектральная плотность мощности солнечного излучения в УФ-области спектра: 1 — излучение Солнца над атмосферой; 2 — у поверхности Земли (45° ю.ш.); 3 — у поверхности Земли (45° с.ш.)

В отечественной промышленности наиболее распространены технологии УФ-приемников на основе GaP, GaAs и их твердых растворов [20]. К числу последних разработок относится трехэлементное ФПУ на основе GaP с топологией расположения фоточувствительных элементов, показанной на рис. 19. Диапазон чувствительности 0,3—0,41 мкм обеспечивается оптическим фильтром на входном окне. Приемник снабжен специально разработанным малошумящим бескорпусным предусилителем. В табл. 5 представлены параметры фотоприемников и фотоприемных устройств, разработанных в НПО "Орион" с использованием этих материалов.

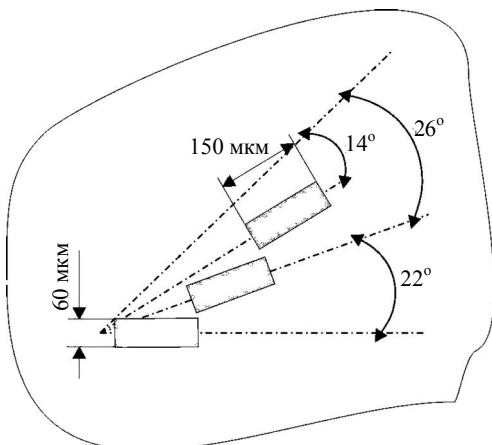


Рис. 19. Трехэлементное ФПУ на основе GaP

Таблица 5

Основные параметры фотоприемных устройств УФ-диапазона НПО "Орион"

Показатели	На основе		
	GaP	GaAs	GaP <sub>x</sub> As <sub>1-x</sub>
Спектральный диапазон, мкм	0,20–0,51	0,25–0,90	0,25–0,68
Длина волны λ <sub>max</sub> , мкм	0,43–0,44	0,8	0,55–0,65
Число элементов фокальной плоскости	1–3	1	1
Размер элемента, мм.	1; 0,15–0,06	1	1
Монохроматический порог чувствительности при λ <sub>max</sub> , Вт·Гц <sup>-12</sup>	2(10 <sup>-15</sup> –10 <sup>-13</sup> )	1,5·10 <sup>-14</sup>	≤1·10 <sup>-15</sup>
Токовая чувствительность при λ <sub>max</sub> , А·Вт <sup>-1</sup>	0,15	0,5	0,22

Задачей ближайшего времени должна стать разработка технологии двухмерных УФ-матриц на основе одного из разрабатываемых материалов, чувствительных в УФ-области спектра (GaP—GaAs, GaN—AlN, InN—GaN).

### ТГц-излучение и устройства для его регистрации

Обычно под ТГц-излучением понимают область частот (длин волн), лежащую в интервале 10<sup>11</sup>—10<sup>13</sup> Гц (30 мкм—3,0 мм). Терагерцовые волны сочетают в себе свойства ИК- и радиодиапазона. Как и радиоволны, они обладают большой проникающей способностью. В то же время излучение этого диапазона можно легко сфокусировать, подобно видимому и ИК-излучению. Тем

самым получается альтернатива рентгеновским лучам. Однако в отличие от рентгеновских, терагерцовые волны проникают в организм человека, не причиняя вреда, а возможность фокусировки обеспечивает повышение разрешающей способности, позволяя получать очень четкие изображения внутренних органов. ТГц-излучение хорошо проходит через мутные и мелкодисперсные материалы из-за резкого подавления релеевского рассеяния ( $1/\lambda^4$ ). Спектроскопия в терагерцовом диапазоне интересна тем, что в этом диапазоне лежат линии поглощения как простых, так и сложных молекул, соответствующие вращательным колебаниям, межмолекулярному взаимодействию и колебаниям молекулярных комплексов. Спектры сложных биологических молекул в этом диапазоне содержат линии, соответствующие вращательным, так называемым торсионным колебаниям, дальнедействующим взаимодействиям, а также взаимодействиям между атомными группами, связанными через слабые водородную и ван-дер-ваальсову связи. При этом положение и форма линий, их интенсивность сильно зависят от конформации молекулы, от внешней среды, в которой она находится. Отсюда следуют области применения терагерцовой фотозлектроники, такие как биология, материаловедение, экология и др. Наконец, электромагнитные волны терагерцового диапазона легко проникают через пластмассы, сухую древесину, ткани и т. п., но хорошо поглощаются металлами, компонентами взрывчатых и наркотических веществ и их можно использовать для обнаружения последних.

В настоящее время появился ряд новых типов источников терагерцового излучения: милливаттные генераторы субпикосекундных импульсов на основе фемтосекундных лазеров, мощные лазеры на свободных электронах и др. Достаточно широк и спектр устройств, исследуемых в качестве детекторов такого излучения: от фотоприемников на основе халькогенидов свинца, таких как  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ,  $Pb_{1-x}Mn_xTe$ , легированных в основном примесями III группы, где обнаруживается фотоотклик на длинах волн 176 и 241 мкм [56], и вплоть до болометрических приемников, в том числе и сверхпроводящих.

Тем не менее, в фотозлектронике терагерцовый диапазон освоен пока недостаточно. Это связано с трудностями детектирования фотонов с энергией 0,04—0,004 эВ. С использованием неохлаждаемого микроболометра формата 160×120 на длине волны 130 мкм в последнее время удалось получить пороговую энергию на один пиксел около  $3,7 \cdot 10^{-10}$  Дж при визуализации терагерцового изображения со скоростью 90 кадр/с [57].

Для увеличения мощности сигнала, попадающего на чувствительные элементы приемника или несканирующего тепловизора, например боломет-

рического, на входе оптической системы можно использовать квантовый усилитель (КУ) бегущей волны. Идеи применения механизмов квантового усиления слабых оптических сигналов, в том числе в диапазоне 8—14 мкм, развиты в работах НПО "Орион" [58]. Для такого "преддетекторного" усиления фотосигналов в терагерцовой области длин волн необходим соответствующий лазер. В литературе уже имеются сообщения о мощных импульсных терагерцовых лазерах с активной средой из  $D_2O$  и длиной волны около 385 мкм, для оптической накачки которых используются  $CO_2$ -лазеры ( $\lambda = 10,26$  мкм) с энергией импульса в несколько десятков джоулей. Проведенные нами расчеты показывают, что в такой аппаратуре с использованием теплового болометрического приемника можно регистрировать энергию импульса терагерцового излучения порядка  $10^{-18}$  Дж на каждый пиксел, что на восемь порядков превосходит достигнутую в устройстве без КУ.

### Метаматериалы и нанотехнологии в ИК-фотозлектронике

При резонансном взаимодействии электромагнитного излучения (ЭМИ) с композитными структурами, состоящими из чередующихся слоев металла и диэлектрика нанометровой толщины, могут возникать совершенно новые свойства, отличающиеся от свойств слоев, составляющих композит. Если на заданной частоте для такой среды оказывается, что  $\epsilon < 0$  и  $\mu < 0$  ( $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость,  $\mu$  — магнитная восприимчивость), то можно говорить о материале, имеющем отрицательный коэффициент преломления  $n = -(\epsilon\mu)^{1/2} < 0$  [59]. Подобные искусственные композитные структурированные материалы со свойствами, недостижимыми в природе, сейчас принято называть метаматериалами [60]. На их основе уже разрабатывается и изготавливается довольно обширный класс радиоэлектронных устройств — линзовые антенны и др.

При взаимодействии ЭМИ со структурированной поверхностью метаматериала при определенных условиях могут возбуждаться поверхностные колебания электронного газа — поверхностные плазмоны в металлических пленках, когда вся энергия сосредоточена в узкой окрестности границы раздела металл—диэлектрик, а состояние поверхности существенно влияет на распространение поверхностных волн. Поэтому подобные структуры можно использовать как очень чувствительные сенсоры, например в биоаналитике. Изменяя с помощью электрического поля диэлектрическую проницаемость в одной из составляющих композитной структуры, можно при заданном угле падения и длине волны изменять интенсивность отраженного луча ЭМИ (плазмонные модуляторы). В устройстве, показанном на рис. 20, в

НПО "Орион" экспериментально реализована модуляция лазерного излучения и определены условия, необходимые для реализации эффективной модуляции на длинах волн 1,15; 3,39 и 10,6 мкм [61]. Таким же образом могут работать оптические элементы, удаляющие из полихроматического пучка лучи с заданной длиной волны.

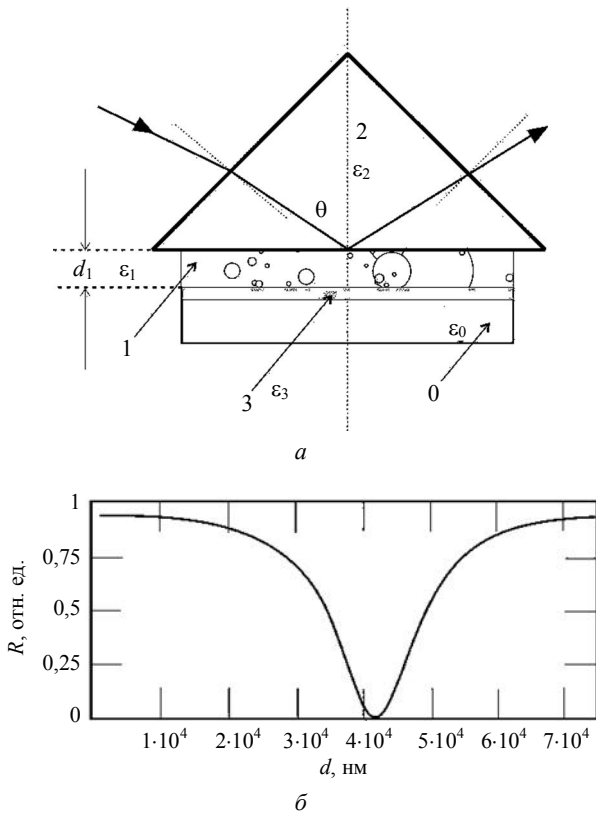


Рис. 20. Устройство типа плазмонного модулятора, где экспериментально реализована модуляция лазерного излучения на длинах волн 1,15; 3,39 и 10,6 мкм:

*a* — плазменный модулятор: 0 — подложка; 1 — диэлектрик (воздушный слой); 2 — согласующая призма из (BaF<sub>2</sub>); 3 — наноразмерный металлический слой (Au,  $d_3 = 40$  нм); *б* — зависимость коэффициента отражения  $R$  от толщины воздушного слоя  $d_1$  (угол падения  $\theta = 45,77^\circ$ )

Такие устройства выглядят чрезвычайно перспективными для получения спектральной инфор-

мации при построении отображающих спектрометров (ОС) для решения задач мульти-, гипер- и ультраспектральной селекции различных целей. Эти приборы обеспечивают получение изображений в любых требуемых узких спектральных интервалах из относительно широкого спектрального диапазона. С помощью ОС, которые можно также называть мультиспектральными тепловизорами, удастся наблюдать в оптических изображениях фрагменты, различающиеся спектральной яркостью в выбранной узкой спектральной полосе, тогда как при наблюдении тех же объектов в широком спектральном диапазоне яркости фрагментов усредняются и объем получаемой оптической информации значительно уменьшается. Технология матричных фотоприемных устройств форматов  $N \times N$  и  $M \times N$  позволяет применять здесь наиболее перспективные методы получения пространственной информации. В ОС на основе "смотрящих" матриц может быть использовано двухмерное поле зрения и возникает дополнительная возможность реализации режима "сканирования окном", в котором двухмерное поле зрения ступенчато (по кадрам) перемещается по исследуемому объекту в продольном направлении [62]. Для получения спектральной информации могут использоваться методы оптической фильтрации, например с использованием устройств на основе плазмонного резонанса в наноструктурированных средах, описанные выше, которые позволяют осуществить быструю перестройку прибора на фильтрацию любой узкой полосы в пределах рабочего диапазона устройства.

О возможности использования туннельно-прозрачных барьеров в наноразмерных МТДП-структурах (металл—туннельный диэлектрик—полупроводник) на основе узкозонных твердых растворов КРТ впервые сообщалось в работе [63]. Некоторые свойства энергетических барьеров в МТДП-структурах из КРТ исследовались в работах [64, 65]. Структура МТДП-фотодиода из КРТ показана на рис. 21.

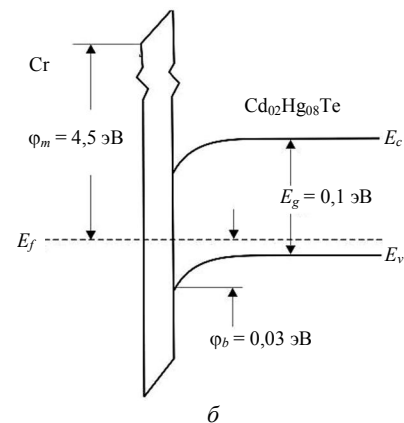
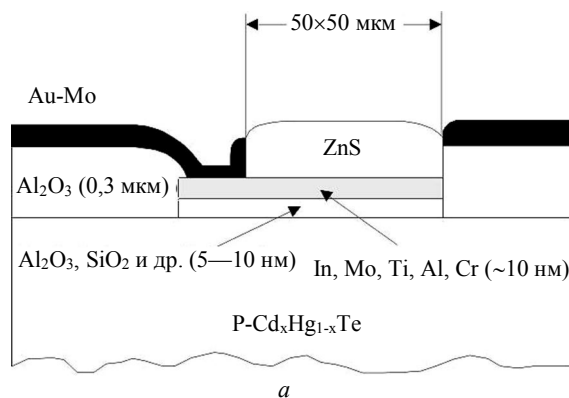


Рис. 21. Наноразмерная МТДП-структура на основе  $Cd_{02}Hg_{08}Te$ : *a* — структура МТДП-фотодиода; *б* — энергетическая диаграмма барьера

Свойства МТДП-структур в основном определяются энергетическим барьером, образующимся после нанесения барьерного металла поверх туннельного диэлектрика, а также параметрами границы раздела диэлектрик—полупроводник. Если плотность поверхностных состояний на этой границе после пассивации туннельным диэлектриком составляет величину  $N_{ss} < 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ , то при отработке способа последующего нанесения металлического слоя так, чтобы при осаждении металла не получилось резкого “возмущения” и генерации поверхностных состояний на границе раздела, величина  $N_{ss}$  и после металлизации должна остаться низкой. Туннельный диэлектрик здесь играет роль “экрана”, защищающего полупроводниковую поверхность от воздействий, способных вызвать появление дополнительных поверхностных состояний в процессе осаждения металла.

Исследования показали, что фотоприемники с такой структурой элементов обладают чувствительностью, сравнимой с ФП на основе  $p\text{-}n^+$ -переходов, но при этом имеют заметно меньший разброс параметров по массиву ФЧЭ, что характерно для “классических” фотодиодов Шоттки, например, на основе силицида платины. Кроме того, в технологии таких ФП исключены операции ионной имплантации и не требуется постимплантационный отжиг структур, что существенно упрощает технологию изготовления приборов.

### Заключение

В статье рассмотрено современное состояние и научно-технологические предпосылки развития ряда базовых технологий инфракрасной фотоэлектроники, результаты создания фотоприемных устройств, “смотрящих” и ВЗН-матриц и других систем цифровой обработки синтеза изображений, матричных формирователей тепловизионного видеосигнала на их основе.

Представленный материал наглядно демонстрирует, что инфракрасная фотоэлектроника по-прежнему остается одним из ключевых направлений современного оптического приборостроения, причем имеющим огромный научно-технический потенциал для дальнейшего развития.

### Литература

50. *Destefanis G., Tribolet P.* Advanced MCT Technologies in France // Proc. SPIE, 2007. V. 6542. P. 65420D1—65420D16.
51. *Kinch M. A.* 50 Years of HgCdTe at Texas Instruments and Beyond // Ibid. V. 7298. P. 72982T1—72982T23.
52. *Tribolet P., Destefanis G., Ballet P., Baylet J., Gravrand O., Rothman J.* Advanced HgCdTe technologies and dualband developments // Ibid. 2008. V. 6940. P. 69402P—69402P14.
53. *Elliott T.* Recollection MCT Work in UK and Southampton // Ibid. 2009. V. 7298. P. 72982M—72982M23.
54. *Bratt P. R., Johnson S. M., Rhiger D. R., Tung T., Kalisher M. H., Radford W. A., Garwood G. A., Cockrum C. A.* Historical perspectives on HgCdTe material and device development at Raytheon Vision Systems // Ibid. V. 7298. P. 72982U1—72982U35.
55. *Горелик Л. И., Полесский А. В., Тренин Д. Ю., Сорокин А. Н.* Экспериментальная апробация алгоритма обработки слабоконтрастных тепловизионных изображений в двухдиапазонной системе. Тр. 51-й науч. конф. Моск. физико-техн. института. — М.: Изд-во МФТИ, 2008. — 227 с.
56. *Хохлов Д. П.* Высокочувствительные приемники терагерцового излучения на основе нового класса полупроводниковых материалов // УФН. 2006. Т. 176. № 6. С. 983—986.
57. *Демьяненко М. А., Есаев Д. Г., Овсяк В. Н., Фомин Б. И., Асеев А. Л., Князев Б. А., Кулипанов, Г. Н., Винокуров Н. А.* Матричные болометрические приемники для инфракрасного и терагерцового диапазонов // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 12. С. 5—11.
58. *Курбатов Л. Н.* Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. — М.: Изд-во МФТИ, 1999.
59. *Веселаго В. Г.* Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  // УФН. 1967. Т. 22. Вып. 3. С. 517—526.
60. *Sihvola A.* Metamaterials in electromagnetics // Metamaterials. 2007. 1. P. 2—11.
61. *Кононов А. С., Куликов К. М., Пономаренко В. П., Свиридов А. Н., Седнев М. В., Селиванов А. С., Филачев А. М.* Оптико-электронное устройство для управления оптическим излучением на основе метаматериала с наноразмерным металлическим слоем // Прикладная физика. 2010. № 2. С. 120—125.
62. *Sellar R. G., Boreman G. D.* Classification of imaging spectrometers for remote sensing applications // Optical Engineering. 2005. No. 44(1).
63. *Салмин Е. А., Пономаренко В. П., Стафеев В. И.* Полевой транзистор со структурой МТДП на основе кадмий—ртуть—теллур // ФТП. 1988. Т. 22. Вып. 6. С. 1142—1144.
64. *Damnjanović V., Ponomarenko V. P., Elazar J. M.* Electrical characteristics of HgCdTe Schottky diode photo-detectors with passivation layers transparent to free carriers // Semicond. Sci. Technol. 2007. V. 22. P. 137—144.
65. *Damnjanović V., Ponomarenko V. P., Elazar J. M.* Photoelectric characteristics of HgCdTe tunnel MIS photo-detectors // Ibid. 2009. V. 24. P. 1—6.



## Current state and new prospects of the semiconductor infrared photoelectronics

*M. D. Korneeva<sup>1</sup>, V. P. Ponomarenko<sup>1,2</sup>, A. M. Filachev<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Orion R&P Association, 9 Kosinskaya str., Moscow, 111402, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>MIPT, 9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow region, 141700, Russia

*The paper discusses 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. The paper discusses the results of development of “staring” and TDA focal plane arrays based on  $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$  and InSb for spectral regions 8–12, 3–5, 1–2  $\mu m$  with  $2\times 96$ ,  $2\times 256$ ,  $4\times 288$ ,  $2\times(2\times 288)$ ,  $6\times 576$ ,  $256\times 256$ ,  $384\times 288$  formats, digital imaging systems, and also imaging modules on their basis.*

PACS: 85.60.-q

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

Bibliography — 16 references.

*Received November 22, 2010*