

УДК 621.383

Фотоприемники и фотоприемные модули нового поколения (к 55-летию НИИ-801 — НПО «Орион»)

В. П. Пономаренко, А. М. Филачев

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

Рассмотрены результаты разработок фотоприемных устройств для областей спектра $1,5 \div 2,5$, $3 \div 5$ и $8 \div 14$ мкм, полученные в последнее время в Научно-производственном объединении «ОРИОН». В системах тепловидения и тепlopеленгации с высоким пространственным и температурным разрешением используются фотоприемники с минимальным размером чувствительных элементов и максимальным отношением сигнал/шум на выходе считывающей микроэлектроники. Наибольшее развитие получили субматричные фотоприемники ($M \times N$), работающие в режиме временной задержки и накопления (ВЗН), а также «смотрящие» матрицы ($N \times N$). Приведены сравнительные параметры и характеристики фотоприемников с промежуточным и глубоким охлаждением на основе PbS (2×1536), PbSe (1×256), InSb (384×288), CdHgTe (2×256 , 4×128 , 128×128 , 384×288) с размерами фоточувствительных элементов от 100 до 30 мкм. Рабочие температуры обеспечиваются термоэлектрическим охлаждением или микрокриогенными охладителями, работающими по циклу Стирлинга. Приводятся результаты разработок быстродействующих фотодиодов из Ge, Si и InGaAsP для оптической связи и дальнометрии в интервале длин волн $0,8 \div 1,7$ мкм, а также фотодиодов из CdHgTe с быстродействием до 1 ГГц для лазерной локации на длине волны 10,6 мкм.

1. Введение

Фотоприемники и фотоприемные устройства являются важнейшими элементами любой оптико-электронной системы и по существу определяют ее основные характеристики. Требования, которые предъявляются к приемникам для тепловидения и тепlopеленгации, как правило, весьма различны. Это связано с существенными различиями фоно-целевых условий, присутствующих на реальном театре применения ИК-аппаратуры. Невозможно удовлетворительно решить все задачи, используя только один спектральный диапазон или один «универсальный» приемник. Тем не менее, в настоящее время достаточно прочно утвердился взгляд на основные типы фотонных приемников для базовых применений в окнах прозрачности земной атмосферы: $1,5 \div 2,5$ мкм — фоторезисторы из PbS с промежуточным охлаждением ($T_{\text{раб}} = 293 \div 195$ К); $3 \div 5$ мкм — фоторезисторы из PbSe, фоторезисторы и фотодиоды из $\text{Cd}_{0,3}\text{Hg}_{0,7}\text{Te}$ ($T_{\text{раб}} = 195 \div 77$ К), фотодиоды из InSb ($T_{\text{раб}} = 77$ К); $8 \div 14$ мкм — фотодиоды и фоторезисторы из $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$ с охлаждением до температур жидкого азота ($T_{\text{раб}} = 77$ К). В последнее время активное развитие получили приборы с использованием тепловых микроболометрических матриц с рабочей температурой вблизи комнатной. Типичные характеристики спектральной чувствительности таких приемников

Рис. 1. Спектральные зависимости фотоотклика нескольких фотоприемников НПО «ОРИОН», фоторезистора из PbS (1), фотодиода из InSb (2), фотодиода из CdHgTe (3), фоторезистора из CdHgTe (4), микроболметра (5)



приведены на рис.1. Для задач оптической локации, связи, дальнометрии в диапазоне 0,8÷1,7 мкм разработан и серийно выпускается широкий спектр неохлаждаемых лавинно-пролетных и pin-фотодиодов на основе Ge, Si и InGaAsP с быстродействием 10^{-9} — 10^{-10} с. Для лазерной локации и связи на длине волны 10,6 мкм (длина волны излучения CO₂-лазера) разработаны сверхбыстродействующие фотодиоды из CdHgTe, в том числе для работы в режиме оптического гетеродинамирования, с минимально обнаруживаемой мощностью $P_{\min} = 10^{-19}$ — 10^{-20} Вт·Гц⁻¹ на частотах 0,6÷1,0 ГГц.

Каждый из этих типов фотоприемных устройств устойчиво занимает свою «нишу» в оптоэлектронике, позволяя создавать ИК-аппаратуру для различных задач обнаружения и наведения на цель с учетом требуемых параметров системы. Работы по полупроводниковым приемникам ИК-диапазона ведутся в НПО «ОРИОН» более сорока лет. В это время происходила активная разработка способов изготовления фоточувствительных элементов, методов их исследования, серийных технологий. Некоторые итоги исследований и разработок описаны в работах [1—2].

Процессы реорганизации в науке и промышленности, произошедшие за это время в России, хорошо известны.

НПО «ОРИОН» сохранил свои позиции в области микрофотоэлектроники, техники ночного видения, электронных и ионно-плазменных технологий. Результатам разработок посвящен специальный журнал “Russian Journal of Applied Physics”. С 1998 г. восстановлено регулярное проведение конференции по фотоэлектронике, труды которой публикуются в сборнике “Proc. SPIE.” С историей развития фотоэлектроники в НИИ 801 – НПО «ОРИОН» можно ознакомиться, прочитав работы Л. Н. Курбатова [3].

В настоящей статье приведены результаты последних исследований в области физики и технологии ИК-фотоприемников.

2. Фоточувствительные материалы для фотоприемников

Параметры многих фотоприемников НПО «ОРИОН» уже достигли значений, близких к теоретическому пределу. Во многом это стало возможным благодаря

серьезным успехам в полупроводниковом материаловедении и развитию теории физических явлений и технологии таких сложных полупроводников, как соединения групп A^3B^5 , A^2B^6 и др.

2.1. Халькогениды свинца PbS и PbSe

Сульфид свинца PbS в настоящее время является одним из наиболее изученных и технологически отработанных материалов для фотоприемников с длиной волны максимума фоточувствительности $\lambda_m = 1,9 \div 2,8$ мкм (293 К). В последние годы наибольшее распространение получил метод химического осаждения пленок PbS на различные диэлектрические подложки как более производительный и экономичный по сравнению с методом нанесения в вакууме. Получаемые поликристаллические пленки представляют собой двухфазную систему, в которой низкоомные кристаллиты n-типа окружены слоями, имеющими противоположный тип проводимости. Образующиеся на границах этих кристаллитов потенциальные барьеры способствуют эффективному пространственному разделению фотоносителей, в результате чего заметно возрастает время жизни и, следовательно, фоточувствительность фоторезисторов. Аналогичный механизм имеет место и для селенида свинца PbSe, для которого максимум фоточувствительности $\lambda_m = 3,6 \div 3,8$ мкм (293 К) смещается в длинноволновую область при понижении температуры, позволяя создавать эффективные фоторезисторы на область спектра $3 \div 5$ мкм с термоэлектрическим охлаждением ($\lambda_m = 4,0 \div 4,6$ мкм при $T_{\text{раб}} = 195$ К).

В последнее время основные разработки НПО «ОРИОН» в этом направлении были сосредоточены на создании методов управляемого синтеза пленок PbS и PbSe с помощью технологических факторов. Варьируя условия роста, оказалось возможным под контролем изменять в достаточно широких пределах такие характеристики пленок, как граничную длину фоточувствительности ($\lambda_{\text{св}}$), инерционность (τ), темновое сопротивление (R_d) и др. Было показано, что распределение и плотность центров зародышеобразования кристаллитов, формирующих пленку, а в конечном итоге их размеры, полностью определяются материалом подложки, пред-ростовой обработкой ее поверхности, а также степенью пересыщения по сульфиду и селениду свинца и кислородосодержащим фазам. В пленках с относительно мелкими кристаллитами возрастает τ , а $\lambda_{\text{св}}$ сдвигается влево [4]. Конечным результатом этих исследований в НПО «ОРИОН» стала разработка промышленной технологии изготовления слоев сульфида свинца с $\tau \leq 1 \cdot 10^{-4}$ с (293 К) и малым вкладом шумов типа $1/f$ для фоторезисторов с малой инерционностью. Для высокочувствительных неохлаждаемых фоторезисторов используется материал с $\tau = (3 \div 4) \cdot 10^{-4}$ с. Размеры образцов позволяют изготовить одноэлементные приборы с размерами элементов от 6×6 мм² до 10×10 мм², а также многоэлементные линейки и матрицы с размерами элементов от 40 до 100 мкм и числом элементов до 3000 с топологией по требованию заказчика. Неоднородность параметров по площади порядка 25×25 мм² не превышает $(1 \div 4)\%$. Аналогичные процессы отработаны и для PbSe, позволяя выпускать мало- и многоэлементные фоторезисторы с числом элементов до 256, $\tau_{293\text{К}} = (2 \div 5) \cdot 10^{-6}$ с, $\tau_{195\text{К}} = (25 \div 50) \cdot 10^{-6}$ с.

2.2. Теллурид кадмия-ртути $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ)

Первые объемные монокристаллы и эпитаксиальные слои КРТ были выращены в НПО «ОРИОН» еще в 1969 году, тогда же были изготовлены первые фотодиоды с р-п переходом методом высокотемпературной диффузии атомов Hg при отжиге в насыщенных парах.

Впоследствии методы выращивания КРТ были развиты и доведены до серийного производства в НПО «ГИРЕДМЕТ».

Объемные монокристаллы КРТ с $X = 0,2 \div 0,3$ *n*-типа проводимости для фоторезисторов на области спектра $3 \div 5$ и $8 \div 14$ мкм в настоящее время выращиваются методом перекристаллизации из предварительно синтезированной шихты с непрерывной подпиткой зоны расплава из твердой фазы с последующим отжигом в парах ртути для получения необходимых электрофизических свойств [5]. Этот метод позволяет получить монокристаллы КРТ диаметром около 50 мм с неоднородностью по составу $\pm 0,005$ мол. % CdTe, концентрацией электронов $n = (1 \div 5) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, подвижностью $\mu_n = (1,5 \div 3) \cdot 10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, временем жизни $\tau > 10^{-6} \text{ с}$. Малоугловые границы, включения второй фазы отсутствуют, а плотность дислокаций $\sim 10^5 \text{ см}^{-2}$. Кристаллы позволяют проводить изготовление многоэлементных фоторезисторов со средним значением обнаружительной способности $D^*(\lambda_m, 1200, \theta = 40^\circ, 1) = \sim 8 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$, что близко к теоретическому пределу для приведенных условий. Сейчас можно констатировать, что физико-технологические проблемы выращивания объемных монокристаллов КРТ с необходимыми для фотоприемников свойствами в России решены.

Для фотодиодов из КРТ, особенно матричных, необходимы эпитаксиальные слои. Наиболее технологически отработанным методом создания эпитаксиальных слоев в настоящее время является жидкофазная эпитаксия [6]. Слои состава $X = 0,2 \div 0,3$ выращиваются на подложках из $Cd_yZn_{1-y}Te$ ($y = 0,02 \div 0,05$) путем охлаждения раствора-расплава на основе теллура с последующим отжигом в парах ртути для снижения концентрации электрически активных акцепторных дефектов. Этот метод позволяет получать слои *p*-типа диаметром $25 \div 30$ мм и толщиной $15 \div 40$ мкм с концентрацией дырок $p = (0,7 \div 2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, подвижностью $\mu_p = 400 \div 650 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, и временем жизни $\tau = \sim (15 \div 30) \cdot 10^{-9}$ сек. Разброс состава X по площади слоев лежит в пределах $\Delta x = \pm (0,003 \div 0,005)$ мол. % CdTe. Материал позволяет проводить изготовление многоэлементных матричных (288×384) и субматричных (2×256) приемников для диапазонов $3 \div 5$ и $8 \div 12$ мкм.

Параллельно в Институте физики полупроводников СО РАН развивается метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Здесь в качестве подложек используются пластины GaAs диаметром около 40 мм с буферными слоями из CdZnTe. Этим методом получены слои с электрофизическими параметрами, близкими к материалу, полученному жидкофазной эпитаксией [6]. Однородность слоев по составу составляет $\Delta x = \pm 0,002$ мол. % CdTe, что несколько лучше, чем у жидкофазных слоев. Этим методом получены также слои *n*-типа, пригодные для изготовления фоторезисторов. Для обоих описанных методов получения эпитаксиальных слоев пока характерен один недостаток — наличие некоторых выступов («пиков») на поверхности слоев. Для образцов, полученных жидкофазной эпитаксией, нередко наблюдается отклонение от плоскопараллельности. Это затрудняет объединение матричных фотодиодов с микроэлектроникой считывания.

3. Фотоприемные устройства на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

Создание приемников (фоторезисторов и фотодиодов) из КРТ было начато в НПО «ОРИОН» более тридцати лет назад. К настоящему времени разработано и выпускается несколько десятков фотоприемников и фотоприемных устройств для различной тепловизионной аппаратуры, отличающихся топологией фоточувствительных элементов, конструкцией корпуса, системами охлаждения, параметрами усилительного тракта.

3.1. Многоэлементные фоторезисторы

Для их изготовления чаще всего применяются объемные монокристаллы n -типа проводимости. Обычно фоторезисторы имеют более длинноволновую границу чувствительности ($\lambda_{cv} = 11 \div 12,5$ мкм) по сравнению с фотодиодами, где $\lambda_{cv} = 10,3 \div 10,5$ мкм (рис. 1.1), что для некоторых применений оказывается весьма важным фактором. Причина этого состоит в том, что по мере уменьшения ширины запрещенной зоны E_g в фотодиодах происходит экспоненциальный рост темновых токов, связанных с туннелированием носителей через потенциальный барьер p - n перехода. Это приводит к уменьшению сопротивления фотодиода R_n и соответственному снижению $D^*(\lambda_m)$. Фоторезисторы лишены этого недостатка и при их изготовлении можно использовать более узкозонный КРТ с соответственно большей λ_{cv} .

Нами разработаны два основных варианта технологии многоэлементных фоторезисторов из КРТ. На рис. 2,а показана структура чувствительного элемента фоторезистора, изготовленного по одному из таких вариантов. В этом случае присоединение токовых выводов к чувствительному элементу делается вручную с использованием микропайки.

На рис. 2,б показан новый вариант технологии, где металлические дорожки «спускаются» на сапфировый растр, позволяя применение микросварки без опасений повредить чувствительный элемент [7].

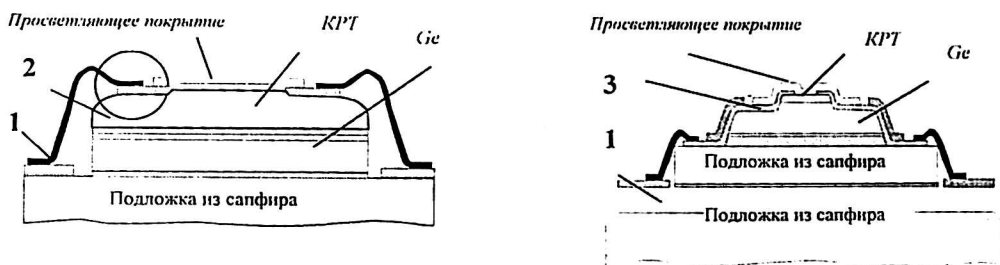


Рис. 2 Структура чувствительных элементов фоторезисторов из КРТ:

а) — по радиационной технологии,

б) — по технологии «со спуском»

1 — проволочный токовый вывод, 2 — область микропайки, 3 — «спускающаяся» металлическая дорожка

С использованием описанных технологий в настоящее время выпускается большинство многоэлементных фоторезисторов, основные параметры которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры фоторезисторов НПО «ОРИОН» из КРТ

Диапазон спектра, мкм	$\lambda_{\text{ср}}$ мкм	Число элементов	Размер элемента, мкм	Обнаружит. способн. $D^*_{\lambda, \text{max}}$ см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹	Апертурный угол	Система охлаждения	Наличие предусилителя
8 – 14	11,5 – 12	1	100x100	$\geq 3 \cdot 10^{10}$	60°	*	+
8 – 14	11,5 – 12	2x12	50x50	$\geq 6 \cdot 10^{10}$	40°	*	
8 – 14	11,5 – 12	1x26	50x50	$\geq 7 \cdot 10^{10}$	26°	***	
8 – 14	11,5 – 12	2x16	50x50	4,1·10 ¹⁰ 7,5·10 ¹⁰ 9,5·10 ¹⁰	180° 40° 20° x10°	** *	+
8 – 14	11,5 – 12	2x48	30x30	$\geq 4 \cdot 10^{10}$	24°	***	+
8 – 14	11,5 – 12	1x128	50x50	$\geq 3 \cdot 10^{10}$	60°	**	+
3 – 5	5 – 5,5	2x16	35x35	$\geq 3 \cdot 10^{10}$	90°	****	+

Система охлаждения: * — интегральный Стирлинг, ** — дифференциальный Сплит-Стирлинг, *** — дроссельный микротеплообменник Джоуля-Томсона, **** — термоэлектрический охладитель

Фотоприемники содержат охлаждаемую диафрагму, обеспечивающую требуемый апертурный угол и могут комплектоваться охлаждаемым фильтром, отсекающим излучение с длиной волны < 5 мкм.

В качестве охладителей используется несколько типов охлаждающих систем, например газовые криогенные машины (ГКМ) Стирлинга, в том числе «интегрального» типа (Integrated Cooler Dewar Assemblies — ICDA), где узел фоточувствительного элемента расположен непосредственно на гильзе охладителя ГКМ. Приемник такого типа показан на рис. 3.

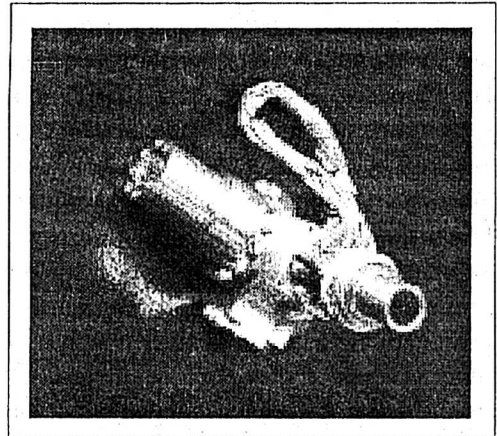


Рис.3. 24-элементный фоторезистор НПО «ОРИОН» из КРТ с $D^*(\lambda_m, 1200, \theta = 40^\circ, 1) = 7,9 \times 10^{10}$ см Гц^{1/2} Вт⁻¹ в конструкции с интегральной ГКМ Стирлинга

Параметры ГКМ:

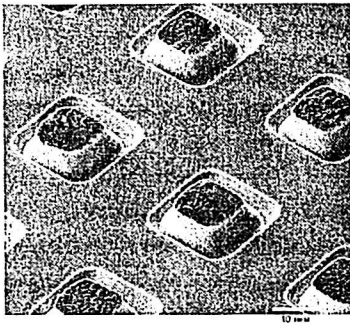
- Рабочая температура — 80 К
- Максимальная холодопроизводительность — 0,25 Вт
- Рабочая холодопроизводительность — 0,15 Вт
- Время выхода на рабочий режим при температуре окружающей среды 293К — 4 мин
- Потребляемая мощность — 15 Вт
- Масса — 0,6 кг

3.2. Матричные фотодиоды

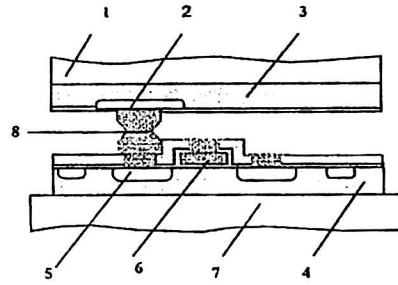
В НПО «ОРИОН» разработаны технологии и ведется выпуск двух основных типов матричных фотоприемников из КРТ — «смотрящих» матриц формата $N \times N$ ($N = 32 \div 288$) для несканирующей аппаратуры и ВЗН-матриц с форматом $N \times M$ для аппаратуры с механическим сканированием ($N = 2 \div 4$, $M = 128 \div 256$). Режим временной задержки и накопления осуществляется по элементам, расположенным в N столбцах. В пределе это обеспечивает увеличение обнаружительной способности приемника $D^*(\lambda_m)$ в \sqrt{N} раз.

В качестве исходного материала используются эпитаксиальные слои $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0,2 \div 0,3$), выращенные методом жидкофазной или молекулярно-лучевой эпитаксии. Характеристики материала приведены в разделе 2.2. Для изготовления $n+$ - p переходов применяется хорошо отработанный метод ионной имплантации бора. Размер имплантированных $n+$ -областей 18×18 мкм². Поверхность слоев пассивируется теллуридом кадмия, что обеспечивает минимальные плотности быстрых и медленных поверхностных состояний и фиксированного заряда на границе раздела, а в конечном итоге долговременную стабильность параметров приборов [8].

Вывод десятков и сотен тысяч фотосигналов из вакуумного корпуса матричного фотоприемника возможен только при наличии определенной коммутации в охлаждаемой зоне. Разработка глубокоохлаждаемых ($T_{\text{раб}} = 80$ К) низкошумящих матричных коммутаторов ведется с середины 80-х годов. Нами разработаны несколько типов коммутирующих устройств (мультиплексоров) на основе n -канальных МОП-транзисторных ключей из Si. Помимо коммутирующих элементов они содержат элементы накопления, управления режимом накопления, а также схемы считывания. Для накопления сигнальных зарядов используется схема прямой инжекции фототока ИК-фотодиода в накопительную емкость через буферный МОП-транзистор, обеспечивающий также усиление по мощности. По нашему мнению, МОП-транзисторные схемы мультиплексирования более перспективны для тепловизионных фотоприемников, чем схемы на основе ПЗС, так как обладают более высокой зарядовой емкостью, что особенно важно при высоких уровнях фоновой освещенности, характерных для диапазона $8 \div 12$ мкм. Реализованы два варианта конструкции ячейки Si-мультиплексора. В первом варианте накопление фотогенерированного заряда осуществляется на собственной емкости фотодиода, соединенного с истоком транзисторного ключа. Во втором варианте конструкция ячейки содержит специальный МОП-конденсатор, одна обкладка которого соединена с истоком входного транзистора, а вторая с подложкой, то есть конденсатор включен параллельно собственной емкости фотодиода. Основные источники шумов мультиплексоров связаны с токами утечек транзисторных ключей. Для матриц с шагом $40 \div 70$ мкм они не превышают величины $\sim 10^{-12}$ А 293 К и снижаются при охлаждении до значений, пренебрежимо малых по сравнению с другими источниками шумов. Для матриц формата 288×384 разработан гибридный вариант мультиплексора, содержащий три отдельные секции: кристалл блока управления, кристалл блока считывания и кристалл-растр, на котором располагается матрица транзисторных ключей с внешними контактами для присоединения выводов. Это упрощает контроль па-



а



б

Рис. 5

а — микрофотография индиевых микроконтактов;
 б — схема объединения «смотрящей» матрицы с мультиплексором:
 1 — подложка CdZnTe, 2 — *p-n* переход, 3 — эпитаксиальный слой, 4 — Si, 5 — исток входного транзистора, 6 — затвор, 7 — сапфировая подложка, 8 — индиевый микроконтакт

Для получения качественного тепловизионного изображения при выводе массива фотосигналов на экран телевизионного монитора (стандарт телевизионного сигнала RS-343A) разработаны специальные устройства обработки, которые входят в комплект поставки матричных фотоприемных устройств (рис. 6а). Эти устройства обработки сигналов осуществляют следующие основные функции: управление работой матрицы путем формирования напряжений питания и тактовых управляющих импульсов для синхронной работы регистров и секций накопления, усиление фотосигналов для дальнейшего аналого-цифрового преобразования, аналого-цифровое преобразование, корректировку неоднородности чувствительности (выравнивание геометрического шума). Так как в матричном приемнике может присутствовать некоторое количество неработающих элементов (обычно 1÷4 %), устройства обработки производят замену сигнала от неработающего элемента на сигнал от одного из соседних элементов матрицы, корректируя тем самым изображение. Матрицы для диапазона спектра 8÷12 мкм поставляются с газовыми микрокриогенными машинами типа Сплит-Стирлинг с холодопроизводительностью обычно 0,7 Вт (рис. 6,б).

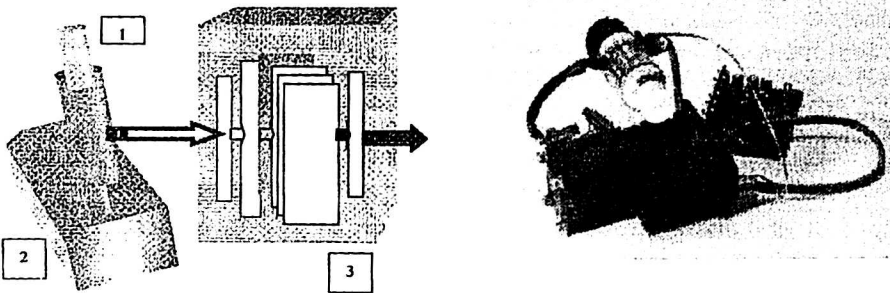


Рис. 6

а — структурная схема базового фотоприемного модуля НПО «ОРИОН»:
 1 — матрица ФД, 2 — микроохладитель, 3 — устройство обработки изображений;
 б — базовый фотоприемный модуль с матрицей из КРТ формата 2×256 для диапазона 8 — 12 мкм

«Смотрящие» матрицы ($N \times N$) имеют регулярную топологию фоточувствительных элементов. Матрицы для режима ВЗН разработаны в двух вариантах: формата $4 \times N$ (N — число элементов в строке) и $2 \times 2N$. Различие между ними показано на рис. 7.

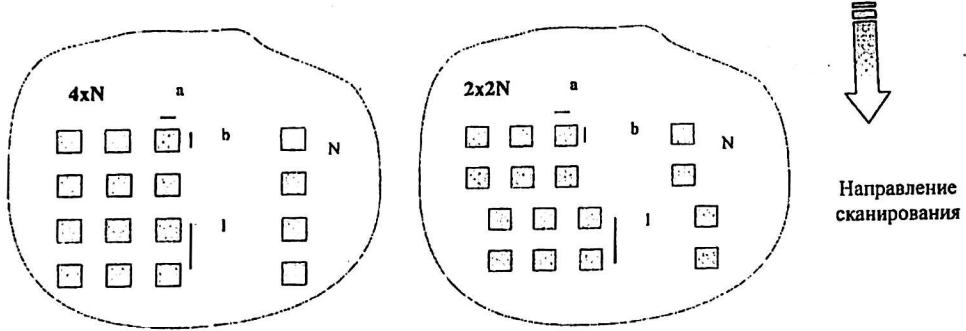


Рис. 7. Топология ВЗН — матриц формата $4 \times N$ и $2 \times 2N$.
 В первом случае накопление происходит по четырем элементам, во втором — по двум

В табл. 2 показаны основные параметры «смотрящих» и ВЗН-матриц НПО «ОРИОН».

Таблица 2

Параметры матричных фотодиодов для диапазона 8—12 мкм НПО «ОРИОН»

Число элементов	Топология	Размер элемента $a \times b$ мкм	Шаг, l мкм	$\lambda_{ср}$ мкм	Апертурный угол	$D^*(\lambda_{max})$ см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹	Система охлаждения
32x32	$N \times N$	40x40	70	10,5	60°	$(3+4) \cdot 10^{10}$	*
128x128	$N \times N$	30x30	35	10,5	60°	$(3+4) \cdot 10^{10}$	**
384x288	$N \times N$	30x30	35	10,5	60°	$(2+3) \cdot 10^{10}$	*
4x48	$4 \times N$	30x30	60	10+10,5	60°	$\geq 7 \cdot 10^{10}$	**
2x96	$2 \times 2N$	30x30	60	10+10,5	51°	$\geq 5 \cdot 10^{10}$	***
2x256	$2 \times 2N$	35x35	70	10,5 11,5 12,5	64°	$\geq 5 \cdot 10^{10}$ $\geq 4 \cdot 10^{10}$ $\geq 4 \cdot 10^{10}$ (67 К)	*

Примечание: Для матриц $2 \times 2N$ и $4 \times N$ даны средние значения $D^*(\lambda_{max})$ в режиме ВЗН.
 Система охлаждения: * — дифференциальный Сплит-Стирлинг, ** — интегральный Стирлинг, *** — микроохладитель Джоуля-Томсона

3.4. Высокочастотные приемники из CdHgTe

Для лазерной локации, дальнометрии и связи в диапазоне 8÷14 мкм необходимы приемники когерентного излучения с большой шириной полосы частот регистрируемых фотосигналов и высокой чувствительностью. Так, для обнаружения быстро движущихся объектов с помощью оптического локатора на CO₂-лазере требуются приемники с полосой пропускания ≥ 1 ГГц и пороговой чувствительностью $\leq 10^{-19}$ Вт/Гц на длине волны 10,6 мкм [9]. В дальнометрии требуются приемники для регистрации достаточно коротких (~10 нс) импульсов с импульсной пороговой чувствительностью $10^{-8} \div 10^{-9}$ Вт.

Гетеродинный прием обеспечивает значительное увеличение чувствительности по сравнению с чувствительностью прямого фотоприема. В этом методе

принимаемый сигнал смешивается с опорным полем оптического гетеродина, а сигнал на выходе имеет промежуточную частоту, равную разности частот сигнального и опорного полей. Интерференция опорного и сигнального поля приводит к увеличению фототока от слабого сигнала до значений, при которых влияние собственных шумов приемника становится незначительным.

Разработка фотодиодов для гетеродинного детектирования проводится в НПО «ОРИОН» с конца 60-х годов. Частотная зависимость гетеродинного порога $P_{\text{пор}}$ фотодиодов из $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$ приведена на рис. 8 (кривые 3, 4). Фотодиоды изготовлены из эпитаксиальных слоев, полученных газовой эпитаксией на подложках CdTe . При частоте $f_{\text{пор}} = 1$ ГГц порог равен $4 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц, а при частоте $f_{\text{пор}} = 0,6$ ГГц — $6 \cdot 10^{-20}$ Вт/Гц. Эти параметры дают возможность использовать такие приборы в качестве приемников для оптической локации в дальнем ИК-диапазоне спектра.

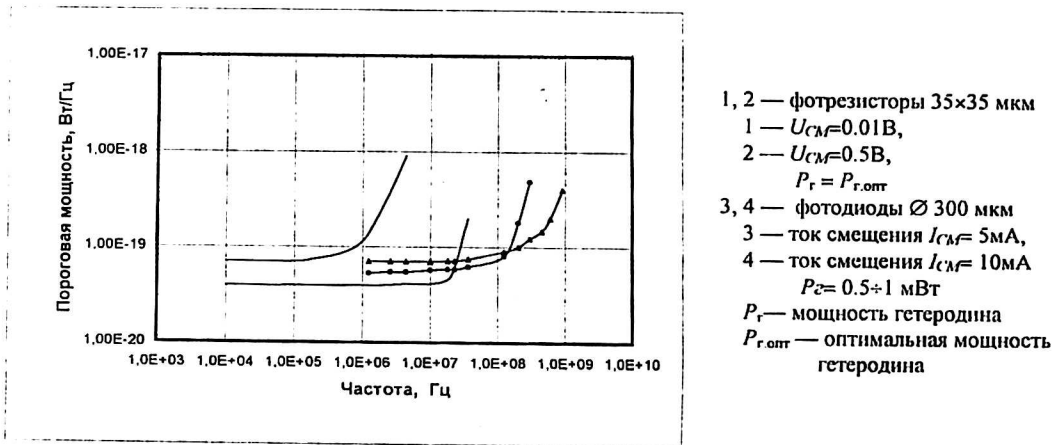


Рис. 8 Частотная зависимость гетеродинного порога для фотодиодов и фоторезисторов из $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$

Недавно было показано [10], что в области частот <100 МГц в режиме оптического гетеродинирования фоторезисторы из КРТ могут иметь порог, сравнимый с фотодиодами. На рис. 8 показаны частотные зависимости гетеродинного порога фоторезисторов из $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$ на основе объемных монокристаллов n -типа (кривые 1, 2), рассчитанные по формуле:

$$P_{\text{пор}} = 2 \frac{h\nu}{\eta} \frac{1}{f(U)} + \frac{P_r}{2U^2} \left[1 + \frac{n_0 V}{\tau_{\text{эфф}}} \frac{h\nu}{P_r \eta f(U)} \right]^2 e^2_{\text{шпу}} F(\omega)^2$$

где $\eta = 0,6$ — квантовая эффективность, $f(U)$ — функция, характеризующая явление вытягивания носителей, P_r — мощность гетеродина, U — напряжение смещения, V — объем фоточувствительного элемента, n_0 — равновесная концентрация электронов, $\tau_{\text{эфф}}$ — эффективное время жизни с учетом поверхностной рекомбинации, $F(\omega)$ — частотная зависимость вольтовой чувствительности, $e^2_{\text{шпу}}$ — спектральная плотность эдс шума предусилителя предполагается $e^2_{\text{шпу}} > 4 kTR$.

Гетеродинный порог фоторезисторов имеет минимум при некоторой оптимальной мощности гетеродина $P_r = P_{r,\text{опт}}$. При этом условии и при $e^2_{\text{шпу}} \sim 1$ нВ·Гц^{-1/2}

фоторезисторы с размерами 35x35 мкм могут иметь гетеродинный порог $(4\div 6) \cdot 10^{-19}$ Вт·Гц-1 в полосе частот до 40 МГц.

4. Фотоприемные устройства на основе InSb

Антимонид индия с шириной запрещенной зоны $E_g = 0,228$ эВ (77 К) имеет край поглощения λ_{cu} вблизи 5,4 мкм и используется при разработках фотоприемников «азотного» уровня охлаждения для спектрального диапазона 3÷5 мкм. В настоящее время для изготовления фотодиодов чаще всего применяются объемные монокристаллы ориентации (100) n-типа проводимости с концентрацией электронов $10^{14}\div 10^{15}$ см⁻³ и подвижностью $(2\div 6) \cdot 10^5$ см²·В⁻¹·с⁻¹ при T = 77 К. В НПО «ОРИОН» разработаны два метода создания p+ -n переходов: имплантация ионов Be+ с энергией 40 кэВ (доза $Q \cong 10^{14}$ см⁻²) и термическая диффузия Cd при температуре ~400 °С. Оба метода позволяют получать резкий p+-n переход с глубиной залегания ~0,5 мкм.

При создании многоэлементных фотодиодов одной из важнейших физико-технологических проблем является получение совершенной границы раздела InSb-диэлектрик с минимальными плотностями фиксированного заряда Q_{fc} и поверхностных состояний N_{ss} , так как при повышенных значениях Q_{fc} могут наблюдаться «взрывные» шумы, связанные с появлением островков туннельной проводимости вблизи выхода p+-n перехода на поверхность полупроводника [11]. Для антимонида индия удовлетворительные результаты были получены при использовании двухслойных диэлектрических покрытий – собственный окисел + моноокись кремния SiO. В этом случае обеспечиваются значения $Q_{fc} \leq +5 \cdot 10^{-8}$ Кл·см⁻², $N_{ss} \leq 10^{13}$ см⁻².

На основе описанных методов в НПО «ОРИОН» разработаны одно- и многоэлементные фотодиоды с параметрами, представленными в табл. 3. Независимо от способа изготовления p+-n перехода фотодиоды имеют максимум fotocувствительности $\lambda_m = 4,8 \pm 0,2$ мкм и токовую чувствительность $S_{\geq} 2$ А·Вт⁻¹ на длине волны $\lambda = \lambda_m$.

Таблица 3

Число элементов	Размер элемента ахб мкм	Шаг l мкм	Апертурный угол	Обнаружит. способн. $D^*(\lambda_{max})$ см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹	Система охлаждения
1x1	500x500	-	180°	$1 \cdot 10^{11}$	*, ***
	1000x1000	-	180°	$1 \cdot 10^{11}$	
	2000x2000	-	180°	$1 \cdot 10^{11}$	
	3000x3000	-	180°	$1 \cdot 10^{11}$	
1x64	120x120	150	60°	$3 \cdot 10^{11}$	**, ***
128x128	30x30	35	180°	$9 \cdot 10^{10}$	*
384x288	30x30	35	180°	$9 \cdot 10^{10}$	*

Система охлаждения: * — интегральный Стирлинг, ** — дифференциальный Сплит-Стирлинг, ** — микротеплообменник Джоуля-Томсона, $T_{раб} = 77$ К.

В настоящее время основное направление работ по фотоприемным устройствам из InSb в НПО «ОРИОН» связано с разработкой «смотрящих» матриц NxN (N = 128÷384). Для изготовления матричных фотодиодов в основном применяется метод термической диффузии Cd в подложку n-InSb. Области между эле-

ментами подвергаются травлению для выделения фоточувствительных элементов, поэтому элементы имеют вид «меза-структур». Для объединения матрицы фотодиодов с матрицей МОП-транзисторов кремниевой мультиплектора используются те же методы, что и при изготовлении матричных фотодиодов из КРТ. На рис. 9 показана структура чувствительного элемента матричного приемника из InSb формата 384x288, а в табл. 3 приведены основные параметры матриц, достигнутые к настоящему времени. Несколько меньшие значения $D^*(\lambda_{max})$ по сравнению с линейчатыми приемниками можно отнести за счет потерь полезного излучения фотосигнала при прохождении через несущую кремниевую подложку и промежуточный слой клея между кристаллом InSb и Si. Лучшие результаты можно было бы получить с использованием эпитаксиальных слоев антимонида индия на широкозонных подложках, прозрачных в области спектра 3÷5 мкм [12].

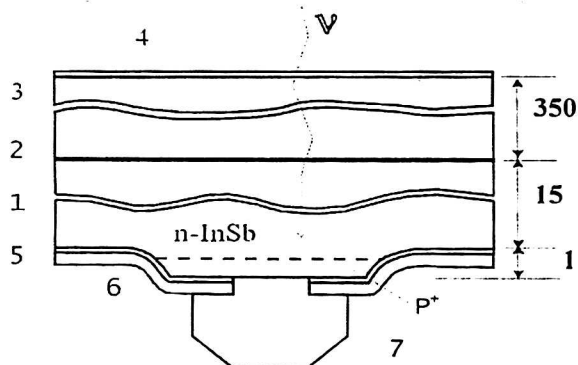


Рис. 9. Структура матричного фотодиода из InSb:
 1 - монокристалл InSb,
 2 - промежуточный слой клея,
 3 - несущая кремниевая подложка,
 4 - антиотражающее покрытие,
 5 - собственный анодный оксид InSb,
 6 - монооксид кремния,
 7 - индиевый микроконтакт

5. Фотоприемники на основе Si, Ge и InGaAsP

Такие фотоприемники необходимы для приема когерентного и спонтанного излучения в системах лазерной дальнометрии, волоконно-оптических линиях связи, лазерных целеуказателях и др. Их рабочий диапазон ограничен длинами волн от 0,4 до примерно 1,7 мкм. Для области $\Delta\lambda_1 = 0,4 \div 1,06$ мкм обычно используется кремний, в области спектра $\Delta\lambda_2 = 0,9 \div 1,6$ мкм могут применяться германиевые приемники, а для более длинноволнового диапазона $\Delta\lambda_3 = 1,1 \div 1,7$ мкм перспективны приборы на основе соединения InGaAs-InP. Последний диапазон особенно важен для волоконно-оптических систем передачи информации с использованием одномодового кварцевого волокна, а также для регистрации излучения в безопасном для человеческого глаза интервале длин волн. Приемники должны с высокой степенью надежности (например, в системах дальнометрии вероятность ложных срабатываний не должна превышать 0,01) регистрировать импульсы излучения с амплитудой $10^{-8} \div 10^{-9}$ Вт и длительностью $\leq 10^{-8}$ с. Фотоприемники с обычным $p-n$ переходом, как правило, по своим пороговым характеристикам и быстродействию не могут обеспечить таких параметров. Напри-

мер, в кремниевых фотодиодах со структурой p^+n или n^+p слишком велика емкость области пространственного заряда перехода, приводящая к значительной инерционности диода, и недостаточна чувствительность на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм из-за слабого поглощения фотонов на краю полосы спектральной характеристики.

В НПО «ОРИОН» разработано несколько типов пороговых быстродействующих фотодиодов, в том числе Si-фотодиоды со структурой $p^+\pi n^+$ (π -Si — кремний, по свойствам близкий к собственному), лавинные Si-фотодиоды со структурой $n^+p\pi p^+$, а также $p^+\pi n$ — фотодиоды на основе InGaAsP. На рис. 10 показаны структуры таких фоточувствительных элементов.

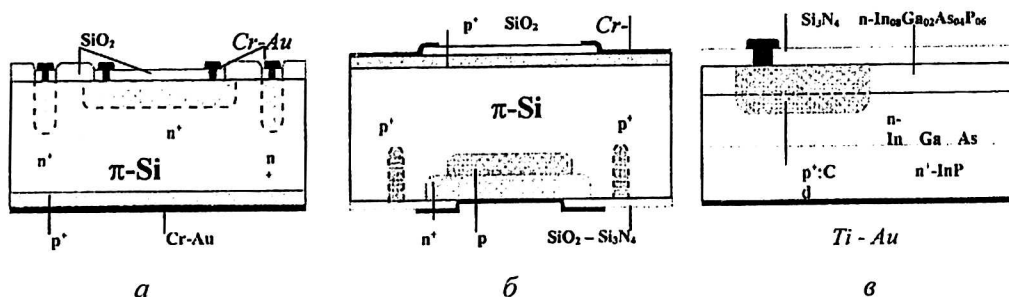


Рис. 10 Структура быстродействующих фотодиодов из Si и InGaAs-InP:
 а — $p^+\pi n^+$ — фотодиод из Si, б — лавинный $n^+p\pi p^+$ — фотодиод из Si, в — $p^+\pi n$ -фотодиод из InGaAsP

Излучение в основном поглощается в π -Si (особочистый кремний с удельным сопротивлением $\rho = 10\div 40$ кОм), имеющем толщину порядка $0,1\div 0,5$ мм. Наличие π -области снижает собственную емкость диода и его инерционность, а сильное электрическое поле вблизи n^+p перехода лавинно-пролетного диода приводит к ударной ионизации и увеличению числа носителей из-за возникновения лавины. В кремниевых лавинных фотодиодах реализован близкий к теоретическому уровень избыточного шума лавины при коэффициентах умножения $100\div 200$. Анализ влияния геометрии чувствительных элементов, характеристик исходного материала, степени легирования p - и n -областей и других на параметры фотодиодов проведен в работах [13÷15]. Перечень более ранних работ содержится в статьях [1, 2]. Эти результаты позволяют проводить инженерное проектирование фотоприемников.

К настоящему времени в НПО «ОРИОН» разработан ряд серийных технологий и ведется выпуск фотодиодов для приема импульсного излучения на длинах волн $e^2_{\text{шпу}}$ 0,85; 1,06 и 1,54 мкм, в том числе большой площади, для лазерной дальнометрии, волоконно-оптических линий связи и др. Ряд фотоприемников снабжен специально разработанной микроэлектроникой предварительной обработки фотосигналов, осуществляющей предварительное усиление, квазиоптимальную фильтрацию сигнала и шума, нормирование сигналов и некоторые другие функции. Основные параметры приемников приведены в табл. 4 и табл. 5.

Таблица 4

Основные характеристики фотодиодов НПО «ОРИОН» из Si и Ge ($T_p = 22^\circ\text{C}$)

Материал фото-диода	Структура фото-диода	Размер элемента мм	Чувствительность $S_{\lambda}, (\text{A}\cdot\text{Bт}^{-1})$		Емкость С, Ф	Постоянная времени $\tau, \text{с}$	Темновой ток, А	Примечание
			$\lambda=0,85 \text{ мкм}$	$\lambda=1,06 \text{ мкм}$				
Si	p^+nn^+	14	0,4	0,3	$\leq 7,5\cdot 10^{-11}$	$\leq 5\cdot 10^{-8}$	$< 7\cdot 10^{-6}$	Одноэлементный фотодиод большой площади
Si	p^+nn^+	0,6	0,45	-	$\leq 5\cdot 10^{-12}$	$\leq 3\cdot 10^{-9}$	$< 1\cdot 10^{-8}$	Фотодиод для ВОЛС с отрезком волокна
Si	p^+nn^+	16	0,4	0,3	$\leq 2\cdot 10^{-11}$	$5\cdot 10^{-9}$	$\leq 2\cdot 10^{-6}$	Квадрантный фотодиод
Si	p^+nn^+	0,5	0,45	-	$\leq 7\cdot 10^{-12}$	$7\cdot 10^{-9}$	$1\cdot 10^{-8}$	Бескорпусной фотодиод для ВОЛС
Ge	$p-n$	1,1	-	0,5	$\leq 1\cdot 10^{-10}$	$5\cdot 10^{-8}$	$1\cdot 10^{-5}$	

Таблица 5

Характеристики быстродействующих фотодиодов из Si и InGaAsP с микроэлектроникой предварительной обработки фотосигналов разработки НПО «ОРИОН»

Материал фото-диода	Структура фотодиода, рабочая длина волны	Пороговая мощность $P_{\text{пор}}, \text{Вт}$	Длительность импульса, нс	Полоса регистрируемых фото-сигналов $\Delta F, 10^6 \text{ Гц}$	Диаметр чувствительной площадки, мм	Функции, выполняемые микроэлектронным трактом
Si	p^+nn^+ 8-элементный $\lambda=1,06 \text{ мкм}$	$1\cdot 10^{-7}$	20÷100	-	10	Предварительное усиление по 8-ми каналам, функции расширения динамического диапазона входных фото-сигналов и др.
Si	n^+ppr 1-элементный $\lambda=1,06 \text{ мкм}$	$2\cdot 10^{-8}$	50÷500	-	0,5	Предварительное усиление с автоматической регулировкой коэффициента усиления, формирование выходного сигнала в уровнях ТТЛ-логики и др.
InGaAsP	p^+nn^+ 1-элементный $\lambda=1,3\div 1,54 \text{ мкм}$	$6\cdot 10^{-10}$	-	3÷600	0,01* 0,05*	Предварительное усиление на основе полевого транзистора из GaAs на входе
InGaAsP	p^+nn^+ 1-элементный $\lambda=1,54 \text{ мкм}$	$5\cdot 10^{-9}$	10÷100	-	0,2	Предварительное усиление на основе полевого транзистора из GaAs на входе

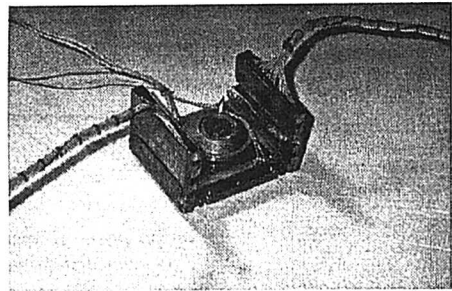
Примечание: указан диаметр сердечника волоконно-оптического кабеля.

6. Фоторезисторы на основе халькогенидов свинца

Такие фотоприемники, отличаясь высокими параметрами и сравнительно низкой стоимостью, находят широкое применение в различных тепловизионных системах, аппаратуре теплового контроля, автоматике и др.

Разработка фотоприемников из PbS и PbSe была начата в НПО «ОРИОН» в 50-х годах. На основе этих соединений могут быть изготовлены как охлаждаемые до температур $T_p = 77 \div 230\text{K}$, так и неохлаждаемые приборы для диапазонов $1 \div 3$ мкм ($\lambda_m = 2,2 \div 2,9$ мкм) и $3 \div 5$ мкм ($\lambda_m = 3,5 \div 4,8$ мкм). Применение технологии управляемого синтеза при осаждении слоев халькогенидов свинца на различные подложки (см. раздел 2.1), позволяет в достаточно широких пределах варьировать длинноволновую границу чувствительности, инерционность и чувствительность фоторезисторов. Разработаны как бескорпусные приборы, так и приемники в стандартных корпусах типа ТО-5. Для охлаждаемых фоторезисторов разработаны специальные конструкции с использованием $1 \div 4$ -каскадных термоэлектрических охладителей. В ряде случаев приемники объединяются со схемами аналоговой обработки и предварительного усиления фотосигналов. На рис. 11 показан внешний вид охлаждаемого ТЭО фотоприемного устройства из PbSe с числом элементов 2×32 и двумя платами преусилителей.

Рис. 11 Фотоприемное устройство из PbSe



В табл. 6 приведены основные параметры фоторезисторов НПО «ОРИОН» из PbS и PbSe.

Таблица 6

Материал	Число элементов	Размер элемента мм	λ_{max} , мкм	$D^*(\lambda_{\text{max}})$ см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹	τ , 10 ⁻³ с	Рабочая температура, К	Система охлаждения	
PbS	1	0,1x0,1	2,2÷2,7	$8 \cdot 10^{10}$	0,1÷0,3	293	-	
			2,5÷3,2	$3 \cdot 10^{11}$	1÷5	196	4-каскадный ТЭО	
	1	1,0x1,0	2,2÷2,7	$8 \cdot 10^{10}$	0,1÷0,3	293	-	
			2,5÷3,2	$3 \cdot 10^{11}$	1÷5	196	4-каскадный ТЭО	
			3,0÷3,5	$1,5 \cdot 10^{11}$	4÷10	77	МТО Джоуля-Томсона	
		1x200	0,08x0,08	2,7÷2,9	$2,5 \cdot 10^{11}$	1÷5	196	4-каскадный ТЭО
	2x100	0,15x0,15	2,7÷2,9	$2,5 \cdot 10^{11}$	1÷5	196	4-каскадный ТЭО	
	2x1536	0,06x0,06	2,7÷2,9	$3 \cdot 10^{11}$	1÷5	196		
PbSe	1	0,1x0,1	3,5÷3,9	$5 \cdot 10^9$	0,005÷0,02	293	-	
			4,0÷4,5	$2,5 \cdot 10^{10}$	0,03÷0,05	196	4-каскадный ТЭО	
	1	1,0x1,0	3,5÷3,9	$5 \cdot 10^9$	0,005÷0,02	293	-	
			4,0÷4,5	$2,5 \cdot 10^{10}$	0,03÷0,05	196	4-каскадный ТЭО	
			4,5÷4,8	$2 \cdot 10^{10}$	0,05÷0,1	77	МТО Джоуля-Томсона	
		1x48	0,15x0,15	4,1÷4,3	$2,5 \cdot 10^{10}$	0,03÷0,05	196	4-каскадный ТЭО
		2x32	0,1x0,1	3,9x3,2	$2 \cdot 10^{10}$	0,02÷0,04	233	2-каскадный ТЭО
		1x256	0,06x0,06	4,1÷4,3	$2 \cdot 10^{10}$	0,03÷0,05	196	4-каскадный ТЭО

Комбинация неохлаждаемых фоторезисторов из PbS с фотодиодами из Si позволяет создавать двухцветные фотоприемники, отличающиеся высокой помехозащищенностью и чувствительностью в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра [16]. Один из вариантов структуры чувствительного элемента такого приемника показан на рис. 12. Излучение из видимой области спектра поглощается кремниевым фотодиодом, а излучение с длиной волны порядка 3 мкм, пройдя через кремний, поглощается фоторезистором из PbS. Порог чувствительности кремниевого фотодиода по отношению к излучению источника с температурой 2850°С не выше $1,5 \cdot 10^{-10}$ лм·Гц^{-1/2}, а удельный порог для PbS-фоторезистора не превышает $1,3 \cdot 10^{-9}$ Вт·Гц^{-1/2}·см⁻¹ по отношению к абсолютно черному телу с $T = 300$ К.

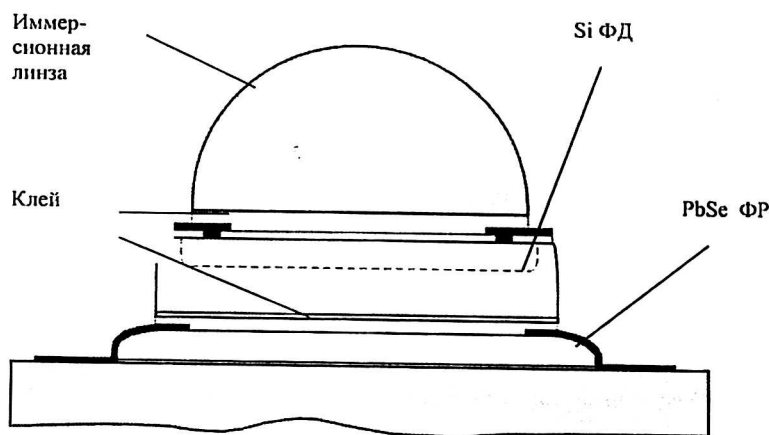


Рис. 12. Структура фоточувствительного элемента 2-х-цветного приемника на основе Si-фотодиода и PbS-фоторезистора

7. Заключение

Несмотря на кажущееся изобилие материалов, фоточувствительных в ИК-области спектра, рассмотренные в настоящей работе фотонные фотоприемники на основе Si, Ge, InGaAsP, PbS, PbSe, InSb, CdHgTe вместе с приемниками на основе барьеров Шоттки в PtSi скорее всего будут доминировать в оптоэлектронном приборостроении ближайшего будущего.

Возможности перечисленных фотоприемных устройств далеко не исчерпаны. Прежде всего это относится к приборам и технологиям КРТ-материала, на долю которого приходится около 60% объема выпуска всех фотоприемников на мировом рынке. Реализованные к настоящему времени форматы и параметры фотодиодных матриц не являются предельными. В первую очередь это относится к ВЗН-матрицам $N \times M$, где число элементов накопления N пока в основном находится в пределах 2÷8 [17]. Дальнейшее увеличение N и соответственный рост $D^*(\lambda)$ позволит создавать более совершенную оптоэлектронную аппаратуру. Это требует новых решений не только в технологии фотодиодов, но и в подходах к организации схем считывания, усиления и мультиплексирования [18], так как по мере возрастания объема накопленного полезного фотосигнала

могут возникнуть ограничения, связанные с уменьшением динамического диапазона приборов. Не исчерпаны и возможности фоторезисторов, где использование идей и технологий объединения фоточувствительных элементов из PbS, PbSe, CdHgTe с кремниевой микроэлектроникой считывания, первоначально развитых для фотодиодов, может привести к созданию гибридных фоторезисторных приемников с числом элементов 10^3 и более.

Продолжается поиск новых методов регистрации инфракрасного излучения. Прежде всего сюда следует отнести экспериментальную реализацию фотоприема на основе различного типа квантовых ям и сверхрешеток в квантоворазмерных структурах из Si/SiGe, GaAs/AlGaAs и др., «классических» легированных сверхрешеток типа *n-i-p-i*, а также δ -легированных *p-n* переходов и многослойных δ -легированных сверхрешеток в Si, GaAs, InSb и др. В последнее время в НПО «ОРИОН» предложен новый тип квантоворазмерного фотоприемника на основе трапецеидальной δ -легированной сверхрешетки [19]. В таких структурах, например на основе InSb или InAs, благодаря эффекту Франца-Келдыша излучение поглощается вплоть до длин волн $\lambda_{cv} \cong 25$ мкм, время жизни носителей может достигать величин порядка 10^{-3} с, а фоторезисторы имеют большую вольт-ваттную чувствительность при сохранении высокого быстродействия. Эти работы закладывают физические основы совершенно новых классов фотосенсоров для различных применений.

Л и т е р а т у р а

1. Хрянов В. Т., Пономаренко В. П., Буткевич В. Г., Таубкин И. И., Стафеев В. И., Попов С. А., Осипов В. В. Пороговые фотоприемники и матрицы ИК-диапазона // Оптический журнал, 1992. № 12. С. 33—44.
2. Khryapov V. T., Ponomarenko V. P., Butkevich V. G., Taubkin I. I., Stafeyev V. I., Popov S. A., Osipov V. V. Optical Sensors//Optical Engineering, 1992. 31(4). P. 678—684.
3. Курбатов Л. Н. Очерки истории развития приемников ИК излучения // Вопросы оборонной техники, Серия 11, 1995. Вып. 3(146)—4(147); 1997. Вып.1(152)—2(153); 1998. Вып.1(154)—2(155) // Прикладная физика, 1999. № 3. С. 5—17.
4. Буткевич В. Г., Глобус Е. Р., Казанцев Г. А., Бутров Ю. П., Лебедева Л. Я. Фотоприемники на основе халькогенидов свинца: состояние работ в ГУП НПО «Орион» и перспективы развития // Прикладная физика, 1999. № 2. С. 104—108.
5. Lakeenkov V. M., Shmatov N. I., Scheltin Yu. F. Recent Achievements in Growth of Large-Size Hg_{1-x}Cd_xTe Single Crystals with Homogeneous Properties // Proc. SPIE, 1999, V. 3819, P. 150—159.
6. Bovina L. A., Boltar K. O., Burlakov I. D., Golovin S. V., Ivanov V. Y., Saginov L. D., Stafeyev V. I., Akimov V. M., Klimanov E. A., Lakeenkov V. M., Sidorov Y. G. Staring 128x128 and 384x288 Focal Plane Arrays // Proc. SPIE, 1999. V. 3819. P. 9—15.
7. Троишкин Ю. С., Фишатов А. В., Алексеевичева В. С., Гусаров А. В., Коршунова А. П., Поповян Г. Э., Посевин О. П. Вакуумные фотоприемники для диапазона 8—12 мкм на основе фоторезисторов из CdHgTe // Прикладная физика, 1999. № 2. С. 63—69.
8. Bovina L. A., Boltar K. O., Stafeyev V. I., Lakeenkov V. M., Loschinina M. A. HgCdTe Photodiode Performance Degradation // Proc. SPIE, 1999. V. 3819. P. 73—75.
9. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов // Под ред. Р. Дж. Киссаю.— М., Радио и связь, 1985.
10. Горелик Л. И., Куликов К. М., Троишкин Ю. С., Шаронов Ю. П. Применение фоторезисторов на основе материала Cd_xHg_{1-x}Te для работы в гетеродинном режиме // Прикладная физика, 1999. № 3. С. 47—54.
11. Астахов В. П., Дудкин В. Ф., Кернер Б. С., Осипов В. В., Смолин О. В., Таубкин И. И. Механизмы взрывного шума p-n переходов // Микроэлектроника, 1989. 18. № 5. С. 455—463.
12. Vesikci G. III—V Infrared Detectors on Si Substrates // Proc. SPIE, 2000. V. 3948. P. 31—39.
13. Холоднов В. А. Коэффициенты лавинного размножения носителей в p-n структурах // Физика и техника полупроводников, 1996. 30. № 6. С. 1051—1063.
14. Холоднов В. А. Оптимальные параметры гетероструктуры порогового лавинного фотодиода с разделенными областями поглощения и умножения // Оптический журнал, 1996. № 6. С. 42—48.

15. Курочкин Н. Е., Холоднов В. А. Переходная характеристика и быстродействие порогового лавинного р-і-п фотодиода при короткоимпульсной засветке // Оптический журнал, 1996. № 6. С. 49—52.
16. Глобус Е. Р., Бутров Ю. П., Нестерова Л. И., Сорокина Ю. Н., Андришин С. Я., Хакушиев П. Е. Двух-канальное фотоприемное устройство на основе кремниевого диода и фоторезистора PbS // Прикладная физика, 1999, № 2, С. 101—103.
17. Chatard J.-P., Tibolet P. Sofradir IR Detectors Today and Tomorrow // Proc.SPIE, 1998. V. 3553. P. 37—47.
18. Осипов В. В., Пономаренко В. П., Селяков А. Ю. Новая гибридная фокальная матрица ИК диапазона // Микроэлектроника, 1997. 26. № 1. С. 12—20.
19. Осипов В. В., Селяков А. Ю., Foygel M. Теория фоторезисторов на основе трапецидальных δ-легированных сверхрешеток // Физика и техника полупроводников, 1999. 33. № 7. С. 870—875.

Photodetectors and photodetective assemblies of a new generation (to the 55-th anniversary of the 801-st Research Institute — the ORION R&P Association)

V. P. Ponomarenko, A. M. Filachev
The ORION R&P Association, Moscow, Russia

Development results of photodetective assemblies for 1,5÷2,5, 3÷5 and 8÷14 μm spectral ranges recently developed in RD&P Center "Orion" are discussed. In thermal imaging and heat detection finding systems with high space and temperature resolution photodetectors with a minimum size of sensitive elements and a maximum signal/noise ratio at the output of readout microelectronics are used. Subarray photodetectors (MxN) operating in the time delay and integration (TDI) mode as well as "staring" arrays (NxN) were the most extensively developed. Comparative parameters and characteristics of photodetectors with intermediate and deep cooling based on PbS (2x1536), PbSe (1x256), InSb (384x288), CdHgTe (2x256, 4x128, 128x128, 384x288) with photosensitive element sizes from 100 to 30 μ are given. Operating temperatures are provided by thermoelectric or microcryogenic Stirling-cycle coolers. Development results of high-speed photodiodes based on Ge, Si and InGaAsP for optical communications and range finding in 0,8÷1,7 μm spectral range as well as CdHgTe photodiodes with large bandwidths up to 1 GHz for 10,6 wavelength laser detection and ranging are given.