

УДК621.383

## Матричные фотоприемники на основе халькогенидов свинца

В.Д. Бочков, Я.С. Бычковский, Б.Н. Дразников,  
И.С. Кондюшин, Н.Ф. Кошавцев

*Предлагается современная концепция изготовления матричных фотоприемных устройств на основе существующих способов изготовления поликристаллических пленок халькогенидов свинца с фоточувствительностью в области спектра 2–3 и 3–4,5 мкм. Фотоприемник представляет собой тонкопленочные фоторезисторы, непосредственно нанесенные на микросхему КМОП мультиплексора, обеспечивающего накопление на время кадра и считывание фотоэлектрических сигналов. Для достижения высоких фотоэлектрических параметров фотоприемник в составе фотопремного устройства установлен на охлаждаемой поверхности термоэлектрического охладителя, обеспечивающего температуру охлаждения фотоприемника 200 К.*

PACS: 85.60.—q

Ключевые слова: фотоприемник, матрица, ИК-диапазон, охлаждение, халькогенид свинца

### Введение

Разработанные в настоящее время многоэлементные линейчатые фотоприемные устройства предназначены, для широкого применения в различной оптико-электронной аппаратуре и приборах и с оптико-механическим сканированием.

Основные применения фотоприемников этого класса связаны с военными применениями (приборы ночного видения), контролем технологических процессов в промышленности, в медицинском приборостроении, в охранных системах.

Возможно применение таких матричных фотоприемных устройств (МФПУ) для оптико-электронной аппаратуры спектральной селекции в области спектра 2–3 мкм, обеспечивающей обнаружение полезных ископаемых, для оценки урожая, а также в спектроанализаторах.

Фотоэлектрические приемники излучения для спектрального диапазона 1–3 мкм из сульфида и селенида свинца известны уже около 70 лет [1]. Несмотря на появление разнообразных фотоприемников из других материалов они до сих пор не теряют своей актуальности благодаря высокому уровню фотоэлектрических параметров, отсутствию необходимости глубокого охлаждения и сравнительно низкой стоимости.

Бочков Владимир Дмитриевич, гл. специалист.  
Бычковский Ярослав Сергеевич, вед. инженер.  
Дразников Борис Николаевич, начальник НТЦ.  
Кондюшин Илья Сергеевич, инженер.  
Кошавцев Николай Федорович, гл. научн. сотр.  
ОАО «НПО «Орион».  
Россия, 111123, Москва, ш. Энтузиастов, 46/2  
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2013 г.

© Бочков В.Д., Бычковский Я.С., Дразников Б.Н., Кондюшин И.С., Кошавцев Н.Ф., 2013

Значительные успехи в области технологии позволили к настоящему времени создать фотоприемники на основе PbS, обнаружительная способность которых при неглубоком охлаждении, близка к теоретическому пределу [1, 2].

Разработки современных технологий направлены на создание матричных фотоприемников, выполненных по интегральным технологиям, где многоэлементные фоточувствительные структуры непосредственно сопрягаются с кремниевыми мультиплексорами, обеспечивающими эффективную предварительную обработку и считывание фотоэлектрических сигналов.

Основными задачами, решаемыми при этом, являются:

- исключение оптико-механического сканирования;
- повышения фотоэлектрических параметров;
- снижение стоимости и повышение конкурентоспособности.

Известны работы [3–5] по созданию матричных фотоприемных устройств на основе PbS, среди которых можно отметить разработку матричных фотоприемников PbS на кремниевой подложке [6]. За счет получения высокоомных фоточувствительных слоев показана возможность [5] изготавливать фоторезистивные матрицы, выполненные по схеме с X-Y-адресацией со сплошным фоточувствительным слоем и с форматом, ограниченным только возможностями изготовления кремниевых мультиплексоров.

Фирмой Litton (США) [3] разработан неохлаждаемый матричный фотоприемник на основе фоторезистивных слоев PbS формата 240x320 относительно низкой стоимости.

Основные недостатки фоторезисторов PbS, проявляемые в сканирующей оптико-электронной аппаратуре, связаны с наличием избыточных шумов вида  $1/f$ , граница которых начинается с частот от 10 кГц и распространяется до долей герца, а также значительной инерционностью фоторезисторов на основе PbS, постоянная времени которых при охлаждении до 200 К достигает 5 мс.

Применение фоторезисторов на основе PbS в матричных охлаждаемых фотоприемниках позволяет преодолевать отмеченные недостатки путем снижения температуры охлаждения и снижения фоновой нагрузки. Инерционность фоторезисторов при этом обеспечивает работу фотоприемника при стандартной кадровой частоте 50 Гц.

Необходимо отметить, что при использовании технологии непосредственного нанесения фоточувствительных слоев PbS на кремниевый мультиплексор возможности получения больших форматов ограничены, в принципе, только возможностями кремниевой технологии изготовления микросхем мультиплексоров. Все это обеспечивает широкие возможности применения и потенциальную конкурентоспособность таких фотоприемных устройств.

Целью данной работы является обоснование современной концепции изготовления матричных фотоприемных устройств на основе существующих способов нанесения поликристаллических пленок халькогенидов свинца с фоточувствительностью в области спектра 2–3 и 3–4,5 мкм

### Анализ фотоэлектрических характеристик фоторезисторов

Чтобы обеспечить эффективное фотоэлектрическое сопряжение между элементами детекторов матрицы на основе PbS и считывающей электроникой, необходимо знать характеристики фоторезисторов и разработать достаточно точную электрическую модель фотопроводимости, для того чтобы общие характеристики системы могли бы быть воспроизведены для любых условий эксплуатации.

Ниже представлены некоторые базовые уравнения, описывающие работу элементов детектора и представляющие его характеристики.

Известно [2], что токовая чувствительность идеального фотоприемника (с квантовым выходом равным  $\eta = 1$  и без внутреннего усиления) на любой длине волны при  $\lambda \leq \lambda_m$  равна

$$S_i = \frac{q\lambda}{hc}, \quad (1)$$

где  $q$  – заряд электрона,  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света в вакууме.

Усиление фоторезистора  $G$  определяется как эффективное отношение времени жизни носителей к времени передачи сигнала, т.е.:

$$G = \frac{\mu V_c}{l^2} \tau. \quad (2)$$

Здесь  $l$  – длина детектора, а скорость носителей  $v$  вычисляется из подвижности носителей  $\mu$  и напряженности электрического поля  $E = V_c/l$ , где  $V_c$  – напряжение смещения,  $\tau$  – постоянная времени фотоответа (время жизни носителей заряда). В соответствии с изложенным, величину токовой чувствительности фоторезистора можно записать в виде:

$$S_i = \frac{\eta G(q\lambda)}{hc}. \quad (3)$$

Обозначив через  $n$  концентрацию свободных носителей (число носителей в единице объема), можно написать выражение для плотности тока в виде:

$$j = qn\theta = q\mu E,$$

При этом удельную проводимость полупроводника можно представить как

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = q\mu n$$

### Шумы фоторезисторов

#### Тепловой шум

Среднеквадратичное напряжение теплового шума можно выразить в виде  $U_T = (4kTR_T\Delta f)^{1/2}$ , здесь  $k$  – постоянная Больцмана.

Однако преобладающими шумами фоторезисторов, принципиально ограничивающими пороговую чувствительность фоторезисторов, являются генерационно-рекомбинационные шумы и шумы вида  $1/f$

#### Генерационно-рекомбинационный шум (G-R-шум).

Спектральная плотность шума  $U_{gr}^2$  на частоте  $f$  определяется следующим выражением:

$$U_{gr}^2 = \frac{Uq\mu\sqrt{2\tau N}}{\sqrt{1+(2\pi f\tau)^2}},$$

где  $U$  – напряжение питания,  $q$  – заряд электрона,  $\mu$  – подвижность носителей,  $\tau$  – постоянная времени (время жизни носителей),  $N$  – концентрация носителей заряда.

#### Избыточный шум вида $1/f$ .

Спектральную плотность этого шума можно описать выражением:

$$U_{ex}^2 = \frac{kI\beta}{f\alpha},$$

где  $k, \beta, \alpha$  – постоянные коэффициенты (типовые значения:  $\beta = 2, \alpha = 1-1,4$ ). Очевидно, что на низ-

ких частотах основное влияние на уровень шума оказывают составляющие  $U_{gr}$  и  $U_{ex}$ . Важное значение имеет соотношение между ними, которое зависит от температуры охлаждения и от фоновой нагрузки на фотоприемник. При этом спектральная плотность и G–R-шума и шума вида  $1/f$  обратно пропорциональна квадрату протекающего через фоторезистор тока.

**«Геометрический шум»**

Геометрический шум (Г-Ш) возникает в сигналах изображения вследствие неоднородности характеристик между отдельными пикселями. При повторном опросе пикселей в аналогичных условиях реализации сигналов практически повторяются. В этом отношении Г-Ш подобен КТС-шуму (шум случайной установки потенциала и заряда на накопительной емкости). Меры, принимаемые для борьбы с этими видами шумов, заключаются в запоминании и вычитании межкадровых сигналов.

**Предельная пороговая чувствительность фоторезисторов.**

Величина обнаружительной способности  $D^*_{\lambda m}$ , ограниченная генерационно-рекомбинационным шумом, определяемым фоном, может быть вычислена по формуле:

$$D^*_{\lambda m} = \frac{\lambda_{max}}{2hc} \eta_{max} \sqrt{\tau / \rho d},$$

где  $\lambda_{max}$  – длина волны в максимуме спектральной чувствительности (см),  $\eta_{max}$  – величина квантовой эффективности при  $\lambda_{max}$ ,  $\rho$  – равновесная концентрация основных носителей заряда (см<sup>-3</sup>),  $\rho_{\phi}$  – концентрация избыточных носителей, вызванная фоновым излучением (см<sup>-3</sup>),  $d$  – толщина фоточувствительного слоя, см,  $R_0$  – сопротивление фоточувствительного слоя, приведенное к квадратной площадке, Ом,  $Q$  – плотность эффективного потока квантов фонового излучения, квант/см<sup>2</sup> с,  $q$  – заряд электрона. При ограничении G–R-шумом, вызванного флуктуациями фонового излучения, когда  $\rho_{\phi} \geq \rho$ , имеем выражение:

$$D^*_{\lambda max} = \frac{\lambda_{max}}{2hc} \eta_{max} \frac{1}{\sqrt{Q}},$$

Когда  $\rho$  сравнимо с  $\rho_{\phi}$ , то имеем следующее соотношение:

$$D^*_{\lambda max} = \frac{\lambda_{max}}{2hc} \eta_{max} \sqrt{\frac{\tau}{(\rho + \frac{Q\tau}{d})d}}$$

Величина  $D^*_{\lambda m}$  при  $\eta_{max} = 1$  называется предельной обнаружительной способностью фоторезистора, ограниченной фоном.

В дальнейшем для оценочных расчетов можно принять величину комнатного фона, равной  $Q =$

$8 \cdot 10^{13}$  квант/см<sup>2</sup> с. У слоев с концентрацией, близкой к собственной,  $\rho = 7 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>,  $D^*_{\lambda max}$  растет до предела ограниченного фоном, а именно,  $D^*_{\lambda max} \leq 2 \cdot 10^{12}$  Вт<sup>-1</sup> см Гц<sup>1/2</sup>.

Реальные типовые характеристики фоторезисторов на основе PbS в зависимости от температуры охлаждения, полученные в результате многочисленных испытаний, приведены на рис. 1. Спектральная характеристика чувствительности при охлаждении до 200 К приведена на рис. 2. Очевидно, что охлаждение приводит к существенному улучшению обнаружительных характеристик фотоприемника.

**Принцип действия и схемотехника МФПУ**

Принцип действия матричного фотоприемного устройства, выполненного с применением фоточувствительных фоторезистивных поликристаллических пленок сернистого свинца обусловлен параметрами и характеристиками фоторезисторов, представленных в предыдущих разделах. Исходя из этих данных, выбраны принцип действия и схемотехника МФПУ, который заключается в следующем.

1. Применение в оптической схеме перед входным окном МФПУ прерывателя-модулятора (далее модулятор), обеспечивающего в фокальной плоскости фотоприемника в течении одного полукадра однородный опорный сигнал, а в течении другого полукадра – сигнал от принимаемой сцены.

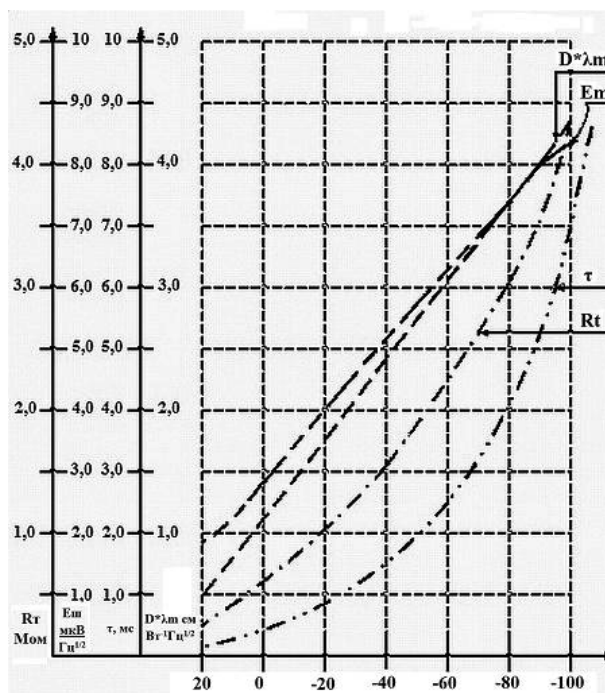


Рис 1. Типовые температурные характеристики фоторезисторов на основе PbS. Примечание: Величины  $D^*_{\lambda m}$  и  $E_m$  измерены при частоте 70 Гц.

2. Матричный фотоприемник выполнен в виде интегральной схемы, где на считывающий кремниевый матричный мультиплексор непосредственно нанесены тонкопленочные фоточувствительные элементы из сернистого свинца.

3. Схемотехника мультиплексора обеспечивает дискретно-импульсную обработку фотоэлектрических сигналов с накоплением фотоэлектрических сигналов за время кадра в каждой ячейке мультиплексора с последующим считыванием выборок сигналов на выход МФПУ.

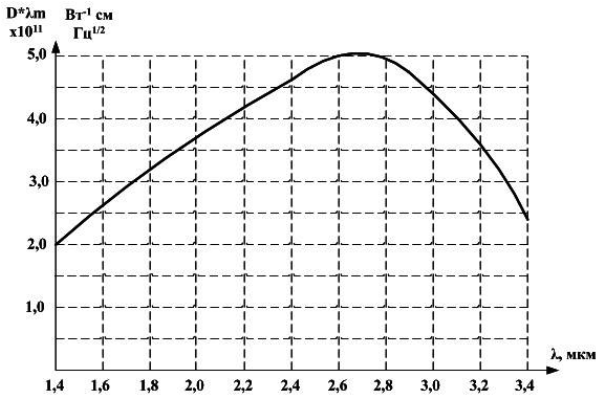


Рис. 2. Типовая спектральная характеристика чувствительности фоторезисторов PbS при температуре охлаждения минус 80 °С

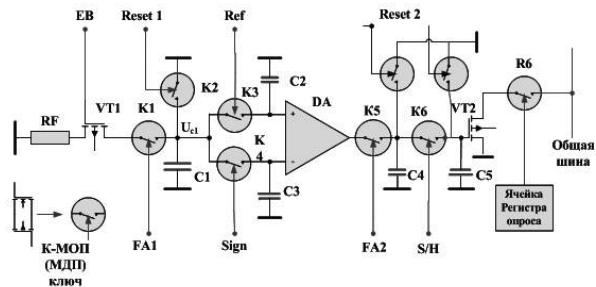


Рис. 3. Функциональная схема ячейки обработки сигнала.

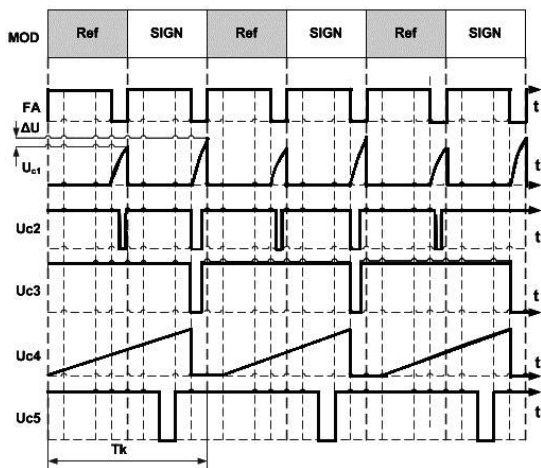


Рис. 4. Временная диаграмма работы ячейки обработки сигнала

4. Конструктивно МФПУ выполнено в герметичном корпусе с встроенным термоэлектрическим охладителем, обеспечивающим охлаждение фотоприемника до температуры 200 К.

На рис. 3 представлена функциональная схема одной ячейки приема и обработки сигналов МФПУ, а на рис. 4 временная диаграмма ее работы.

Такая схема проработана и показала хорошие результаты [4]. Здесь фоторезистор RF включен в исток полевого транзистора VT1 (р-канал), на затвор которого поступает внешнее напряжение, обеспечивающее напряжение смещения и величину тока, протекающего через фоторезистор. С помощью ключа K1 осуществляется заряд конденсатора C1 и последующий сброс заряда (Reset).

При выборе схемотехники обработки сигнала в ячейке необходимо соблюдать ограничения связанные с потребляемой мощностью и занимаемой площадью. При этом необходимо иметь в виду, что величины используемых емкостей определяются главным образом занимаемой площадью. В качестве емкостей обычно применяются полевые МДП-транзисторы, где используется емкость затвор–сток+затвор–исток. При типовой толщине диэлектрика удельная емкость составляет ~ 1пф на 30 мкм<sup>2</sup>. При интегрировании сигнального тока связь между напряжением на накопительном конденсаторе  $U_c$ , интегрируемым током  $I$ , временем интеграции  $t_{ин}$  и величиной емкости  $C$  определяется простым соотношением:

Таким образом, при токе 1 мкА, протекающим через фоторезистор (напряжение смещения 1 В, сопротивление фоторезистора 1 МОм), величине емкости 5 пФ и максимальном напряжении на емкости 2 В время накопления составляет 10 мкс, а для времени накопления, равном времени кадра 20 мс, и такой же емкости ток накопления должен быть 0,5 нА. В результате, такой ток может быть получен как разность между фоновым + сигнальным током сцены и током от опорного сигнала модулятора.

В каждом полупериоде работы модулятора (Ref, Sign) осуществляется выборка и хранение сигналов, считываемых с конденсатора C1 на конденсаторы C2 и C3. На выходе дифференциального усилителя с токовым выходом DA появляется сигнальный ток, равный разности токов, протекающих через фоторезистор в течении сигнального и опорного полупериода работы модулятора. С помощью ключа K5 обеспечивается заряд конденсатора C4 с последующим считыванием (S/H) сигнала на конденсатор C5. Через повторитель

VT2 и ключ К6 сигнал считывается на общую шину и на выход мультиплексора.

Оценка площади, занимаемой элементарной ячейкой мультиплексора, показывает, что при использовании технологии с нормой проектирования 0,5 мкм, размерами ключевых транзисторов 0,7x0,9 мкм и величиной зарядовых емкостей около 5 пФ, можно получить площадь ячейки и шаг матричного фотоприемника 40x40 мкм. При этом площадь фоточувствительной структуры матричного ФП при формате 256x256 элементов составляет около 10x10 мм.

В ОАО «НПО «Орион» проведены исследования и изготовлены экспериментальные образцы фоточувствительных структур Si-SiO<sub>2</sub>-PbS и Si-SiO<sub>2</sub>-PbSe, где показана перспективность применения выбранной технологии при создании ФЧ матриц, работающих при охлаждении до 195 К.

Предлагаемая технология нанесения фоточувствительных резистивных пленок халькогенидов свинца основана на способе осаждения поликристаллических структур из раствора на подложку из стекла. Такая технология [1, 6, 7] позволяет наносить фоточувствительные пленки на кремниевую пластину практически любого диаметра с заранее сформированными микросхемами считывающих мультиплексоров, защищенных от воздействия химических растворов пленкой SiO<sub>2</sub>, причем с высоким процентом выхода годных.

Таким образом, в результате выполнения технологических процессов обеспечивается изготовление на пластине большого диаметра (200 мм и более) фоточувствительных интегральных микросхем, формат которых определяется, главным образом, возможностями интегральной кремниевой технологии. Для защиты алюминиевых контактов от воздействия рабочего химического раствора при осаждении халькогенида рекомендовано применение проводящей пленки из нитрида титана, полученной методом магнетронного напыления. Пленки нитрида титана (Ti<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), толщиной от 700 до 1100 Å, имеют отличную адгезию к алюминию и к сульфиду свинца, надежно защищают алюминий от разрушения в щелочной среде, имеют хорошие омические характеристики на переходах Al-Ti<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-PbS с динамическим сопротивлением 10<sup>0</sup>–10<sup>1</sup> Ом/мм<sup>2</sup>.

Для улучшения омических и конструкционных свойств нижний контакт перекрывался верхним типовым контактом типа Cr-Pd-Au+Au, шунтируя возможный потенциальный барьер на контакте PbS-Ti<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Измерения параметров образцов фоточувствительных элементов из сульфида свинца на кремниевой подложке проводились в двух температурных режимах: при температуре измеряемого элемента равной 293 К и при охлаждении до 195 К.

При этих температурах максимумы спектральной чувствительности для данных образцов находятся в разных областях спектра:  $\lambda_{\max} = 2,0\text{--}2,4$  мкм ( $T=293$  К) и  $\lambda_{\max} = 2,5\text{--}2,7$  мкм ( $T=195$  К), соответственно. Замеры темнового сопротивления, уровня шума, синусоидально модулированного сигнала на универсальной измерительной установке К54.410 а также расчеты фотоэлектрических параметров (ФЭП) элементов проводились по ГОСТ 17772–88. Фотоэлектрические характеристики при этом, практически, соответствовали характеристикам, полученным на кварцевых подложках.

### Конструкция ФПУ

Конструкция ФПУ со снятой крышкой с входным окном представлена на рис. 5.

Матричный фотоприемник (МФП) смонтирован на теплопоглощающей поверхности четырехкаскадного термоэлектрического охладителя (ТЭО), который своей тепловыделяющей поверхностью припаян к цоколю со стеклометаллическими гермовыводами. МФП с помощью плоских кабелей, представляющих нанесенные на полиимидную подложку металлизированные дорожки, электрически соединен с выводами.

Термоэлектрическая батарея (ТЭБ) и газопоглотитель своими электрическими выводами также монтируется на внешние гермовыводы. С помощью газопоглотителя (геттера) имеется возможность однократно или периодически восстанавливать качество вакуума внутри ФПУ [8–10].

Основные ожидаемые параметры и характеристики ФПУ показаны в таблице.

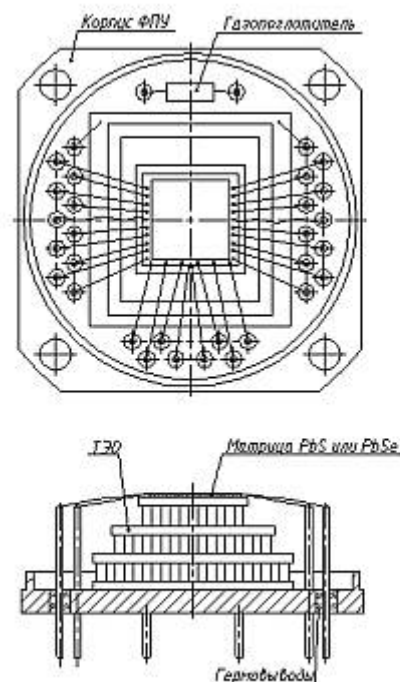


Рис. 5. Внешний вид ФПУ.

Таблица

Материал фотоприемника	PbS
Спектральный диапазон (по уровню 0,5), мкм	1,5÷3,5
Размер фоточувствительного элемента, мкм	25x25÷40x40
Число элементов (формат)	128x128 ÷ 280x320
Обнаружительная способность ( $\lambda_{max}$ ), Вт <sup>-1</sup> см Гц <sup>1/2</sup>	4×10 <sup>11</sup>
Температурная чувствительность PbS, К (295К), (193К)	1–1,5 0,08–0,1
Температурная чувствительность PbSe, К (295К), (193К)	0,35–0,5 0,025–0,05
Вольтовая чувствительность, В/Вт	>3×10 <sup>8</sup>
Количество неработающих площадок, %	<2
Период опроса матрицы, мс	20
Потребляемая мощность ТЭО, Вт	3,0–5,0
Потребляемая мощность матрицы, Вт	0,1
Габаритные размеры, мм	Ø50; H35
Вес, Г	<100

**Заключение**

В статье представлены результаты разработки схемотехнических, конструктивных и технологических вопросов создания матричных фотоприемников (МФП) на основе халькогенидов свинца. Показана возможность достижения предельной пороговой чувствительности МФП на основе PbS ограниченная фоном (BLIP-режим). Предлагае-

мая концепция создания МФП позволяет обеспечить возможность получения крупноформатных (2000x2000 и более) МФП с высоким процентом выхода годных. Предлагаемая интегральная технология обеспечивает широкие возможности производства недорогих и конкурентоспособных матричных фотоприемников, чувствительных в области спектра 2–3 мкм и 3–4,5 мкм, способных найти широкое применение в оптико-электронной аппаратуре различного назначения.

**Литература**

1. Буткевич В.Г., Бочков В.Д., Глобус Е.Р. // Прикладная физика. 2001. № 6. С. 67
2. Филачев А.М., Таубкин И.И. Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. — М.: Физматкнига, 2005.
3. *Veustrum T., Jackson N.* // Procidings of SPIE 2001. V. 4372
4. Бочков В.Д., Воропаев А.И., Храпунов М.Л. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 45
5. Агранов Г.А., Дакин А.М. и др. // Оптический журнал, 1996. № 9. С. 53
6. *Jhabvila M.D., Barrett J.R.* // IEEE Transactions on Elect. Devices. 1982. V. ED-29. No.12. P. 34
7. *Zogg H, Alchalabi K, Zimin D,* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, *Section A*. 2003. V. 512. P.440
8. Антипова М.А., Дразников Б.Н., Бочков В.Д. // Прикладная физика. 2006. № 6. С. 67
9. Антипова М.А., Дразников Б.Н., Казарова Ю.А., Яснова К.И. // Прикладная физика. 2007. № 3. С. 78
10. Бочков В.Д., Бычковский Я.С., Дразников Б.Н. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 231

**Matrix photodetectors on the basis of chalcogenide**

*V.D. Bochkov, Y.S. Bychkovski, B.N. Drazhnikov, I.S. Kondyushin, and N.F. Koshchavtsev.*

Orion R&P Association  
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

*The modern technology of manufacture of matrix receiving devices is offered on the basis of existing ways of manufacture of polycrystalline films chalcogenide with photosensitivity in the field of a spectrum 2–3 microns. The photodetector represents thin-film PbS photoresistors directly put on a chip of CMOS of the multiplexer, providing accumulation on time of a frame and reading of photo-electric signals. For reaching high photo-electric parameters the photodetector in structure focal plane arrays of the device is placed on a cooled surface thermoelectric cooling, providing temperature, of a photodetector 200 K.*

PACS: 85.60.— q

Keywords: photodetector, matrix, IR range, cooling, PbS.