

УДК 621.383

Разработка перспективных матричных фотоприемников на основе сернистого свинца, охлаждаемых до промежуточных температур

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

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

PACS: 85.60.-q.

Ключевые слова: матричный фотоприемник, сернистый свинец, охлаждение, фоторезистор.

Введение

Фотоэлектрические приемники излучения для спектрального диапазона 1–3 мкм из сернистого 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.

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].

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

Основные применения фотоприемников этого класса связаны с военными применениями (замена приборов ночного видения), кон-

тролем технологических процессов в промышленности, в медицинском приборостроении, в охранных системах.

Возможно применение таких матричных фотоприемных устройств (МФПУ) для оптико-электронной аппаратуры спектральной селекции областях спектра 1–3 мкм, обеспечивающей обнаружение полезных ископаемых, для оценки урожая, а также в спектроанализаторах.

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

Бочков Владимир Дмитриевич, главный специалист.
Бычковский Ярослав Сергеевич, ведущий инженер.
Дразников Борис Николаевич, и.о. начальника НТЦ.
Кондюшин Илья Сергеевич, инженер.
ОАО «НПО «Орион».
Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2013 г.

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

слоем и с форматом, ограниченным только возможностями изготовления кремниевых мультиплексоров.

Фирмой Litton (США) [3] разработан охлаждаемый 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 конкурентоспособность таких фотоприемных устройств.

Целью данной работы является обоснование современной технологии изготовления матричных фотоприемных устройств на основе существующих способов изготовления поликристаллических пленок сернистого свинца с фоточувствительностью в области спектра 2–3 мкм.

Анализ фотоэлектрических характеристик фоторезисторов

Для того чтобы обеспечить эффективное фотоэлектрическое сопряжение между элементами детекторов матрицы на основе PbS и считывающей электроникой необходимо знать характеристики фоторезисторов, а также 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 $\eta = 1$ 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 , т.е. эффективное отношение времени жизни носителей к времени передачи сигнала,

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

Здесь l – длина детектора, а скорость носителей v вычисляется из подвижности носителей μ и напряженности электрического поля $E = V/l$, где V_c – напряжение смещения, τ – постоянная времени фотосоответа (время жизни носителей заряда).

В соответствии с изложенным величину токовой чувствительности фоторезистора можно записать в виде

$$S_i = \frac{\eta G(q\lambda)}{hc}, \quad (\text{А/Вт}) \quad (3)$$

Подвижность носителей заряда запишем в виде

$$\mu = \frac{v}{E},$$

где v – средняя скорость дрейфа электронов в электрическом поле (см/с), n – концентрация свободных носителей (число носителей в единице объема ($1/\text{см}^3$))

В полупроводнике возникает направленное движение электрических зарядов (электрический ток), плотность которого $j = qnv = qn\mu E$ (А/см^2).

При этом удельную проводимость полупроводника можно представить как

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = qn\mu,$$

где ρ – удельное сопротивление (Ом м)

Шумы фоторезисторов

Тепловой шум

$$U_T = (4kTR_T \Delta f)^{1/2},$$

где k – постоянная Больцмана. 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

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

где U – напряжение питания, q – заряд электрона, μ – подвижность носителей, N – концентрация носителей заряда.

Избыточный шум вида 1/f

Спектральная плотность шума

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

где k, β, α – постоянные коэффициенты (типичные значения: $\beta = 2, \alpha = 1-1,4$)

Очевидно, что на низких 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

$$D^*\lambda_m = \frac{\lambda_{max}}{2hc} \eta_{max} (\tau / \rho d)^{1/2},$$

где λ_{max} – длина волны в максимуме спектральной чувствительности (см), η_{max} – величина квантовой эффективности при λ_{max} , ρ – равновесная концентрация основных носителей заряда (см⁻³), ρ_ϕ – концентрация избыточных носителей, вызванная фоновым излучением (см⁻³), d – толщина фоточувствительного слоя,

см, R_o – сопротивление фоточувствительного слоя приведенное к квадратной площадке, Ом, Q – плотность эффективного потока квантов фонового излучения, кв/см² с, q – заряд электрона.

При ограничении г/г-шумом, вызванного флуктуациями фонового излучения, когда $\rho_\phi \geq \rho$, имеем

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

Когда ρ сравнимо с ρ_ϕ , получаем следующее выражение:

$$D^*_{\lambda_{max}} = \frac{\lambda_{max}}{2hc} \eta_{max} \left(\frac{\tau}{(\rho + \frac{Q\tau}{d})d} \right)^{1/2}$$

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

В дальнейшем для оценочных расчетов можно принять величину комнатного фона (при апертуре 2ϕ) равной $Q = 8 \cdot 10^{13}$ квант/см² с.

У слоев с концентрацией, близкой к собственной $\rho = 7 \cdot 10^{13}$, $D^*_{\lambda_{max}}$ растет до предела, ограниченного фоном, а именно

$$D^*_{\lambda_{max}} \leq 2 \cdot 10^{12} \text{ Вт}^{-1} \text{ см Гц}^{1/2}.$$

Реальные типовые характеристики фоторезисторов на основе PbS в зависимости от температуры охлаждения, полученные в результате многочисленных испытаний, приведены на рис. 1. Спектральная характеристика чувстви-

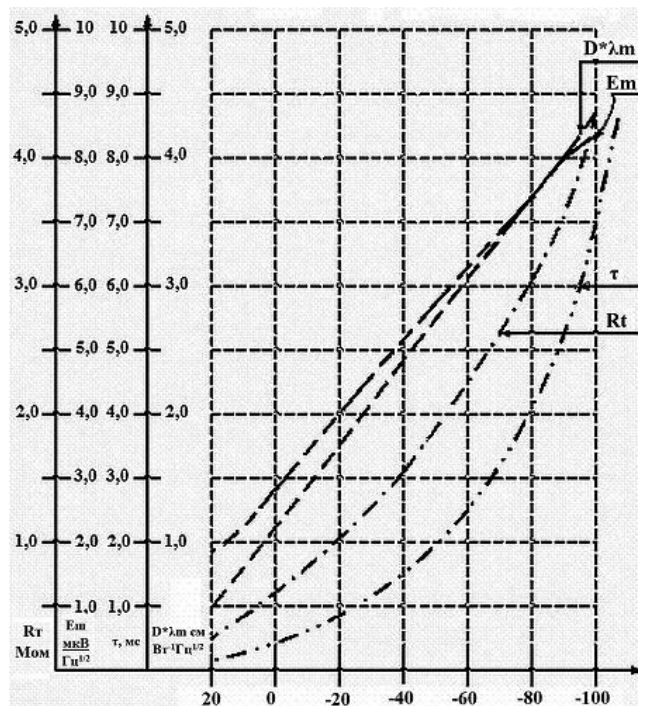


Рис. 1. Типовые температурные характеристики фоторезисторов на основе PbS.

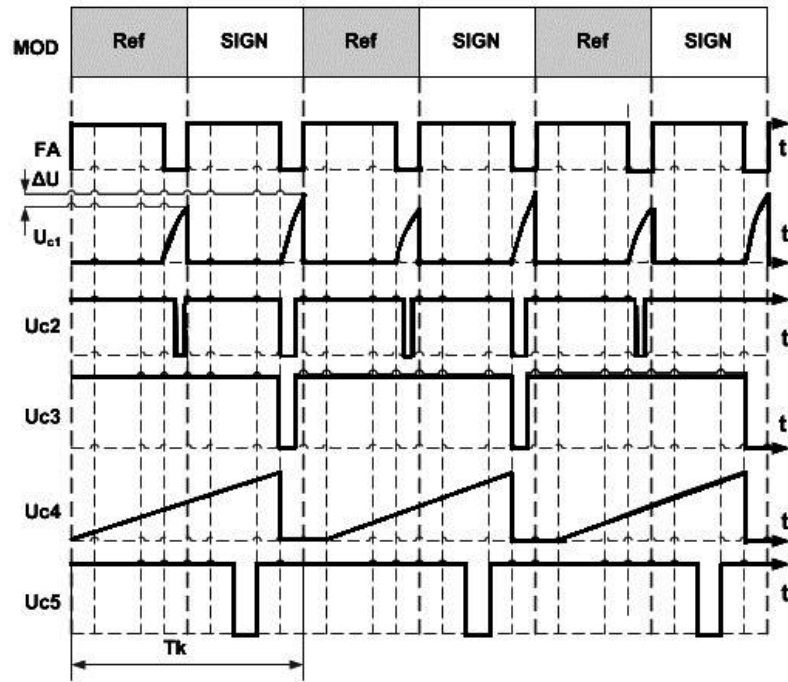


Рис. 4. Временная диаграмма работы ячейки обработки сигнала.

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 ~ 1 пФ/30 мкм². При интегрировании сигнального тока связь между напряжением на накопительном конденсаторе U_c , интегрируемым током I , временем интеграции t и величиной емкости C определяется простым соотношением

$$U_c = \frac{q}{C} = \frac{It}{C}$$

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 С1 на конденсаторы С2 и С3. На выходе диффе-

ренциального усилителя с токовым выходом ДА появляется сигнальный ток, равный разности токов, протекающих через фоторезистор в течение сигнального и опорного полупериода работы модулятора. С помощью ключа К5 обеспечивается заряд конденсатора С4 с последующим считыванием (S/H) сигнала на конденсатор С5. 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 около 10x10 мм.

Технология изготовления PbS

В ОАО «НПО «Орион» поликристаллические плёнки сульфида свинца обычно получают методом химического осаждения из раствора на обычных подложках из плавленого кварца с размерами (25,2x25, 2x0,3) мм³, предварительно вымытых в растворителях (отмывка от полировочных смол) в перекисно-аммиачной смеси и в азотной кислоте. Размеры кристаллитов на поверхности пленки 0,5–2 мкм.

Плёнки сернистого свинца получают из смеси растворов ацетата свинца $Pb(CH_3COO)_2$,

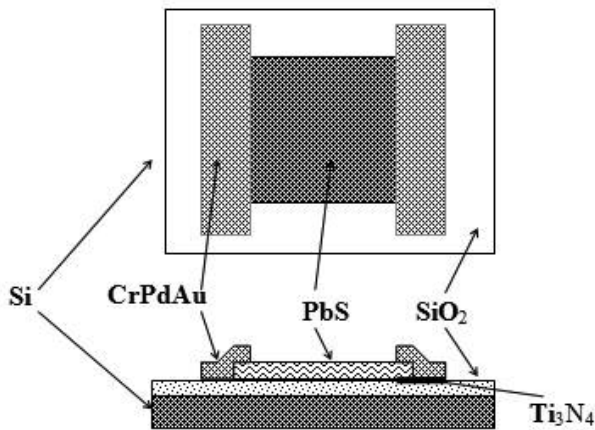


Рис. 5. Схема перекрытия слоев.

тиомочевины $CS(NH_2)_2$ и щёлочи КОН с добавлением серосодержащих восстановителей – сульфита натрия $NaSO_3$, дитионита натрия $Na_2S_2O_4$. Толщина сернисто-свинцовых плёнок 1,2–1,4 мкм.

В ОАО «НПО «Орион» проведены исследования и изготовлены экспериментальные образцы фоточувствительных структур Si-SiO₂-PbS, где показана перспективность применения выбранной технологии при создании ФЧ-матриц, работающих при охлаждении до 195 К.

Увеличение толщины окисла на поверхности кремния до 0,7–1,0 мкм позволяет осаждать на такие подложки качественные слои сульфида свинца, аналогичные слоям, получаемым в типовой технологии на кварцевых подложках. Эффект улучшения адгезии пленок сульфида свинца по мере увеличения толщины окисленного слоя на кремнии связан, по-видимому, с изменением микроструктуры пленки окисла.

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_3N_4), 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_3N_4 -PbS с динамическим сопротивлением 10^0 – 10^1 Ом/мм².

Для улучшения омических и конструктивных свойств нижний контакт перекрывался верхним типовым контактом (см. рис. 5) Cr-Pd-Au+Au, шунтируя возможный потенциальный барьер на контакте PbS- Ti_3N_4 .

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: $\lambda_{max} = 2,0$ – $2,2$ мкм ($T = 293$ К) и $\lambda_{max} = 2,5$ – $2,7$ мкм ($T = 195$ К) соответственно. Замеры темнового сопротивления, уровня шума, синусоидально-модулированного сигнала на универсальной измерительной установке К 54.410, а также расчеты фотоэлектрических параметров (ФЭП) элементов проводились по ГОСТ 17772-88. Фотоэлектрические характеристики при этом практически соответствовали характеристикам, полученным на кварцевых подложках.

Таблица

Ожидаемые параметры ФПУ

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 (λ_{max}), Вт ⁻¹ см Гц ^{1/2}	4÷10 ¹¹
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 ⁸
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; Н35
Вес, Г	<100

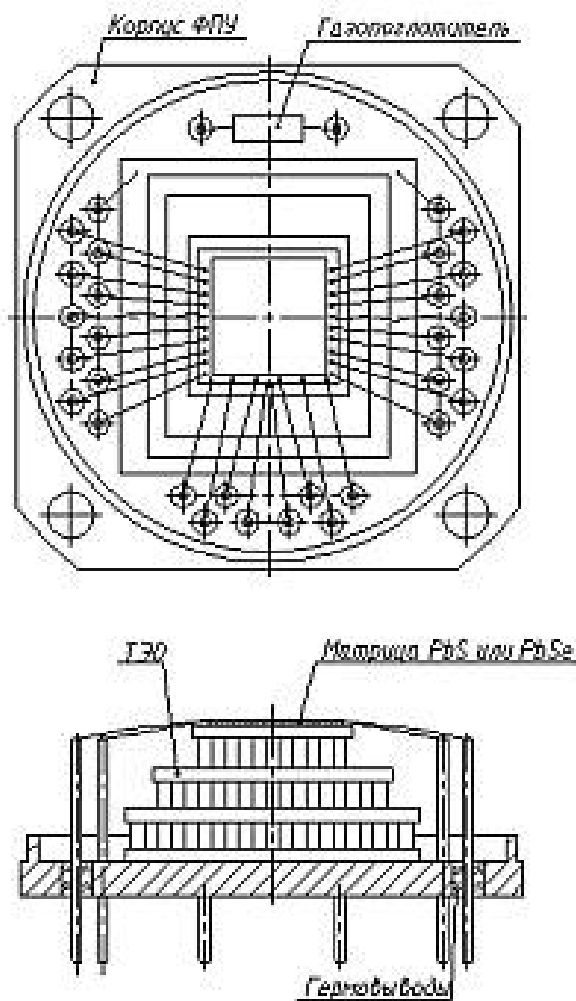


Рис. 6. Внешний вид ФПУ.

Конструкция ФПУ

Конструкция ФПУ со снятой крышкой с входным окном представлена на рис. 6. 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 монтируются на внешние гермовыводы. С помощью газопоглотителя (геттера) имеется возможность однократно или периодически восстанавливать качество вакуума внутри ФПУ [8, 9].

Основные ожидаемые параметры и характеристики ФПУ показаны в таблице.

Заключение

В работе представлены результаты разработки схемотехнических, конструктивных и технологических вопросов, а также анализа потенциальных возможностей достижения предельной чувствительности матричного ФПУ на основе PbS, приближающейся к пределу, ограниченному фоном (BLIP-режим).

Литература

1. Буткевич В.Г., Бочков В.Д., Глобус Е.Р. // Прикладная физика. 2001. № 6
2. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. – М.: Физматкнига, 2005.
3. Beustrum T., Jackson N. // Proceedings of SPIE. 2001. V. 4372
4. Бочков В.Д., Воропаев А.И., Храпунов М.Л. // Прикладная физика, 1999. № 2
5. Агранов Г.А., Дакин А.М. и др. // Оптический журнал. 1996. № 9. С. 53
6. Jhabvila M.D., Barrett J.R. // IEEE, ED-29. 1982. No. 12
7. Zogg Hans, Alchalabi Karim, Zimin Dmitri // 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
9. Антипова М.А., Дразников Б.Н., Казарова Ю.А., Яснова К.И. // Прикладная физика, 2007. № 3

Development of perspective matrix photodetectors on the basis of PbS, cooled up to intermediate temperatures

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

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 PbS 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 array, PbS, cooling, photoresistor.

Bibliography – 9 references

Received February 10, 2013