

УДК 621.383.51

## **МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ПРИЕМНИКИ НА ОСНОВЕ СЕЛЕНИДА СВИНЦА ДЛЯ ОБЛАСТИ СПЕКТРА 2–5 МКМ**

**Н.Э. Тропина**

В работе представлены результаты исследования фотоэлектрических характеристик впервые полученных и разработанных в ОАО НИИ «Гириконд» многоэлементных фотогальванических приемников на основе поликристаллических пленок PbSe и твердых растворов на его основе. Рассмотрена возможность использования таких приемников с узкополосными клиновыми интерференционными фильтрами в качестве фоточувствительного элемента в спектрально-аналитической аппаратуре нового поколения. Приведен расчет оптимального размера чувствительного элемента многоэлементного приемника для восстановления без искажений спектра анализируемого излучения.

**Ключевые слова:** селенид свинца, многоэлементный приемник, спектральный анализ, клиновый интерференционный фильтр.

### **Введение**

Обнаружение и измерение параметров инфракрасного излучения имеют большое практическое значение в различных областях – в военной сфере, системах пожарной безопасности, системах контроля над технологическими операциями, в прикладных и научных исследованиях, медицине, строительстве и других сферах. Поэтому работы, направленные на совершенствование и разработку новых приемников с непрерывно расширяющимися оптическими и электрическими характеристиками, продолжают и в настоящее время.

Диапазон длин волн от 2 до 5 мкм является наиболее информативным с точки зрения задач обнаружения очагов пламени и взрыва, мониторинга таких опасных газообразных веществ, как NO, NO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, аммиак, пропан, метан и др., а применение методов спектрального анализа позволяет с наибольшей достоверностью решать не только указанные задачи, но и многие другие.

Для оперативной обработки информации требуется значительное увеличение скорости сканирования исследуемого объекта, что может быть достигнуто за счет использования многоэлементных фотоприемников. Применение многоэлементных фотоприемников обеспечивает высокие технические и эксплуатационные характеристики оптических приборов, в которых они применяются, поскольку для их создания не нужны дорогостоящие оптические системы и громоздкие механические системы развертки, без которых не обойтись в случае с одноэлементными приемниками. Под разверткой здесь понимается как сканирование по спектру в спектрально-аналитических приборах, так и пространственное сканирование в пеленгационных приборах, например, в тепловизорах.

Многоэлементный приемник излучения определяет совокупность технических характеристик оптического прибора, в котором он используется. В случае приборов, предназначенных для решения задач пеленгации и обнаружения, от размера чувствительного элемента в конечном итоге зависит качество изображения. Получаемое изображение тем качественнее, чем больше массив дискретных элементов приемника. Применительно к многоэлементным линейным приемникам, используемым в спектральных и спектрально-аналитических приборах, необходимо согласование размера чувствительного элемента и аппаратной функции прибора.

В настоящей работе представлены результаты исследования фотоэлектрических характеристик многоэлементных приемников на основе поликристаллических слоев селенида свинца и его твердых растворов. Описаны принципы построения и функционирования клиновых узкополосных интерференционных фильтров, а также приведен расчет оптимального размера чувствительного элемента многоэлементного приемника для теоретически полного восстановления спектра анализируемого излучения в зависимости от аппаратной функции спектрального прибора.

### **Многоэлементные приемники на основе пленок селенида свинца**

Из всего многообразия инфракрасных приемников излучения особый интерес представляют многоэлементные приемники излучения, в которых фоточувствительный элемент работает в фотогальваническом режиме. Представленные сегодня на рынке фотоприемные устройства, работающие по этому принципу в спектральном диапазоне от 2 до 5 мкм, практически не доступны широкому кругу потребителей из-за своих эксплуатационных характеристик (требуют охлаждения до криогенных температур) и высокой стоимости (несколько тысяч долларов за штуку) [1]. Поэтому актуальность решения задач, связанных с созданием дешевых и простых в использовании многоэлементных фотоприемных устройств, не оставляет никаких сомнений.

Перспективными полупроводниковыми материалами для изготовления ИК-приемников, чувствительных в диапазоне от 2 до 5 мкм, являются селенид свинца и твердые растворы на его основе. Разработанная ранее технология позволила получать материалы с проводимостью, близкой к собственной, и реализовать фотогальванический эффект.

В данной работе формирование многоэлементных приемников осуществлялось на поликристаллических слоях селенида свинца и твердых растворов Pb<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Se, полученных вакуумным осаждением на стеклянные подложки размером 18×18 мм и толщиной

150 мкм. После напыления слои подвергались высокотемпературной обработке в атмосфере воздуха. Структурные особенности таких поликристаллических пленок отражены в работе [2].

Спектральное распределение чувствительности полученных слоев исследовалось при комнатной температуре на измерительной установке, собранной на базе спектрометра ИКС-21. В качестве калиброванного фотоприемника использовался висмутовый болометр, а в качестве осветителя – силитовый стержень (глобар). Результаты измерений представлены на рис. 1.

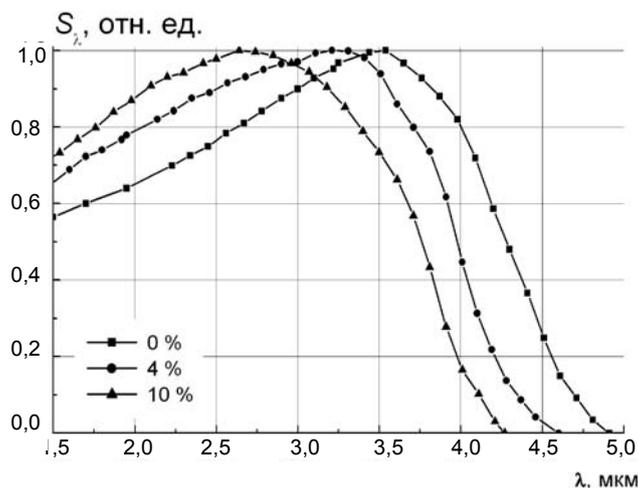


Рис. 1. Спектральное распределение чувствительности фотоприемников в зависимости от концентрации CdSe в твердом растворе  $Pb_{1-x}Cd_xSe$

Введение селенида кадмия в селенид свинца в пределах области растворимости (не более 20 % мол.) позволяет изменять ширину запрещенной зоны материалов от 0,2 эВ до 0,6 эВ, а, значит, дает возможность управлять спектральными характеристиками приемников.

Поликристаллические слои, получаемые по указанной технологии, имеют ограниченные размеры, и формирование на них многоэлементной структуры с большим количеством элементов с существующими на данный момент размерами  $1000 \times 1000$  мкм<sup>2</sup> и  $2000 \times 2000$  мкм<sup>2</sup> становится проблематичным. В статье [3] представлены результаты работы по миниатюризации дискретного фотогоальванического элемента до размеров  $250 \times 250$  мкм<sup>2</sup>. На базе таких элементов созданы и успешно прошли испытания макетные образцы приемников для обнаружения перегрева букс железнодорожных вагонов.

Для реализации 48-элементного приемника и исследования его фотоэлектрических параметров разработана топология с двурядным расположением элементов (рис. 2, в), где учтены все особенности формирования планарной барьерной структуры с высокой квантовой эффективностью: линейный размер базы элемента имел тот же порядок, что и диффузионная длина основных носителей заряда (~30–50 мкм). При такой величине базы реализуется линейная зависимость тока короткого замыкания от светового потока (рис. 3). Линейность нарушается при увеличении размера базы, сопротивление которой будет играть роль дополнительного нагрузочного сопротивления. Такая топология линейной структуры позволяет получить среднее значение удельной обнаружительной способности при комнатной температуре  $D^* \approx 1,23 \cdot 10^{10}$  смГц<sup>1/2</sup>Вт<sup>-1</sup>. Топограмма удельной обнаружительной способности линейной 48-элементной структуры представлена на рис. 4.

Многоэлементные фотоприемники предназначены для использования в качестве функционального элемента в системах тепловидения, автоматического контроля высо-

котемпературных технологических процессов, в спектрально-аналитической аппаратуре, в том числе и для идентификации анализируемого вещества.

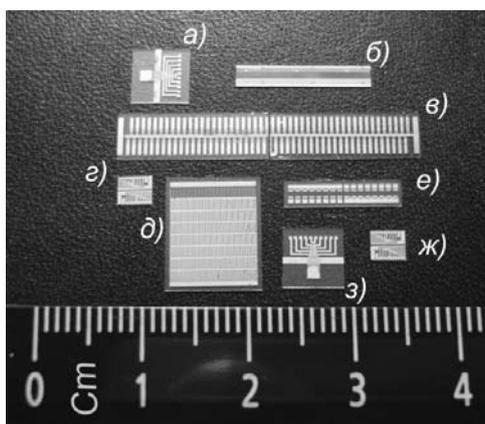


Рис. 2. Различные топологии многоэлементных приемников

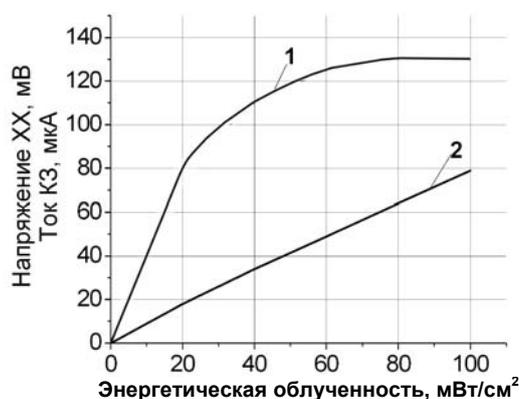


Рис. 3. Вольт- (1) и ампер-ваттная (2) характеристика фотогальванического приемника

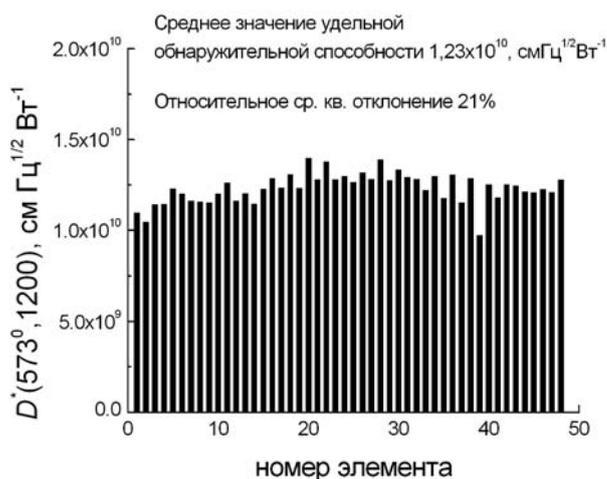


Рис. 4. Топограмма удельной обнаружительной способности линейной 48-элементной структуры

Для получения четкой картины требуется достаточно большое количество элементов. Увеличения числа элементов может быть реализовано конструктивными методами: либо за счет дальнейшего уменьшения размеров одиночного элемента, либо с помощью объединения нескольких многоэлементных структур в одну. На данном этапе

успешно опробован второй конструктивный метод увеличения числа элементов. Группирование структур происходит по близким значениям параметров. Такими параметрами служит среднее значение обнаружительной способности и ее относительное среднее квадратичное отклонение.

### Оптимизация размера чувствительного элемента многоэлементного приемника спектрального прибора

При обработке данных спектрального анализа необходимо определить амплитуду измеряемой спектральной линии либо ее интегральное значение. Это обуславливает необходимость восстановления в каком-то приближении контура линии, который складывается из физического и аппаратного контуров [2]. Для большинства применяемых источников излучения основной вклад в уширение линии вносит аппаратный контур. Этот контур может быть вычислен при расчете оптической системы прибора. В некоторых случаях он симметричен и может быть описан функцией Гаусса:

$$F(x) = Ae^{-4\ln\frac{x^2}{\Delta^2}}, \quad (1)$$

где  $\Delta$  – полуширина аппаратной функции спектрального прибора,  $A$  – амплитуда спектральной линии,  $x$  – расстояние вдоль оси, расположенной в направлении дисперсии.

Выражение, связывающее полуширину гауссовской аппаратной функции спектрального прибора с шириной чувствительного элемента, для теоретически полного восстановления контура спектральной линии в соответствии с теоремой Котельникова имеет вид [3]

$$\operatorname{erf}\left(\sqrt{2\ln\frac{A}{B}}\right) - \left(\frac{B}{A}\right)^2 \sqrt{\frac{8}{\pi}} \ln\frac{A}{B} = \operatorname{erf}\left(\frac{\Delta\pi}{2a\sqrt{2\ln 2}}\right), \quad (2)$$

где  $A = 2Da\sqrt{\ln 2}$ ,  $B = \Delta\sqrt{\pi}\operatorname{erf}\left(\frac{a\sqrt{\ln 2}}{\Delta}\right)$ ,  $a$  – ширина элемента,  $D$  – динамический диа-

пазон фотоприемника. Спектральная полуширина аппаратного контура  $L$  связана с полушириной  $\Delta$  соотношением

$$L = \frac{1}{D_l}\Delta, \quad (3)$$

где  $\frac{1}{D_l}$  – обратная линейная дисперсия спектрального прибора.

Таким образом, по выражениям (2) и (3) и заранее известной спектральной полуширине аппаратной функции спектрального прибора можно вычислить оптимальный размер чувствительного элемента многоэлементного приемника, позволяющий восстановить без искажений контур спектральной линии.

### Клиновые интерференционные фильтры

При конструировании и использовании линейных многоэлементных приемников определенный практический интерес представляют клиновые интерференционные фильтры с изменяющимися по поверхности фильтра оптическими характеристиками. В первую очередь это относится к линейным узкополосным фильтрам, длина волны максимума пропускания которых зависит от координаты на поверхности фильтра. Изменение положение  $\lambda_{\max}$  по заданному закону достигается за счет соответствующего изменения оптических толщин слоев, входящих в структуру многослойного клиновидного

интерференционного покрытия (рис. 5, а). Обычно при реализации на практике предпочтение отдается диэлектрическим интерференционным фильтрам типа Фабри–Перо первого порядка. Однако для увеличения крутизны фронтов контура пропускания фильтра возможно применение фильтров высших порядков или структур с неравнотолщинными слоями. Побочные полосы пропускания блокируются отрезающим клиновым покрытием, наносимым на обратную сторону подложки.

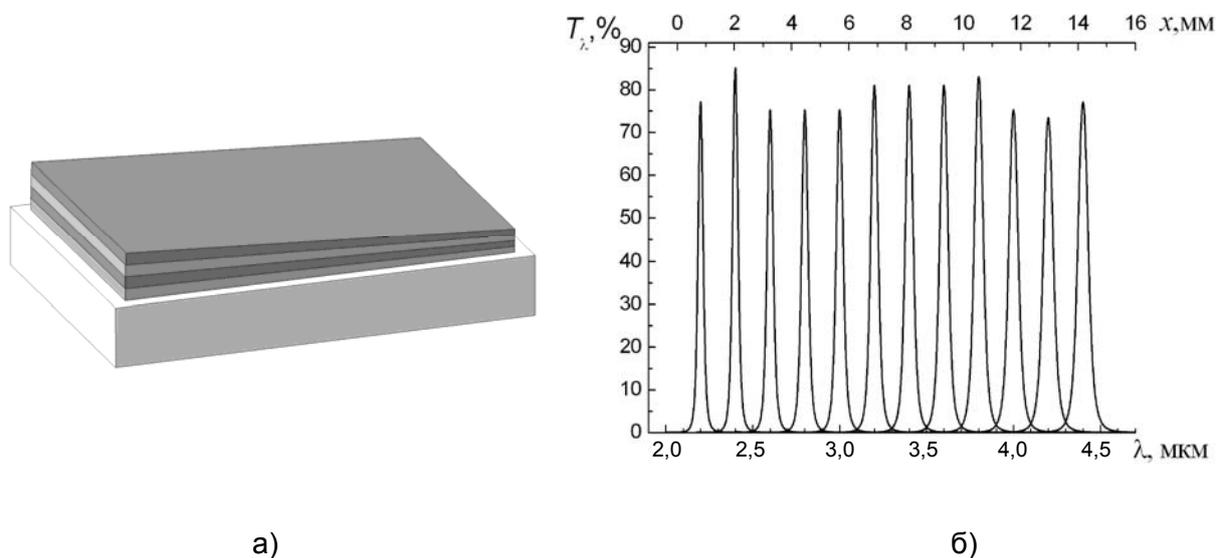


Рис. 5. Клиновидное многослойное покрытие (а) и спектры пропускания фильтра (б) ( $x$  – расстояние от края фильтра)

Например, нами разрабатываются линейные клиновые фильтры на диапазон 1,5–5 мкм с линейной дисперсией 100–150 нм/мм. При этом спектральный интервал, выделяемый фильтром, определяется как  $\Delta\lambda = \delta\lambda + s(d\lambda/ds)$ , где  $\delta\lambda$  – полуширина контура пропускания фильтра,  $s$  – размер пикселя многоэлементного приемника в направлении дисперсии,  $(d\lambda/ds)$  – линейная дисперсия фильтра. Для изготавливаемых фильтров полуширина в указанном диапазоне составляет порядка 1,5 % (рис. 5, б). При указанных линейной дисперсии, полуширине фильтра  $\delta\lambda = 50$  нм и размере пикселя 100 мкм спектральная ширина линии составляет 60 нм. В этом случае спектральное разрешение существенно уступает разрешению, получаемому при помощи приборов с дифракционной решеткой, однако в тех задачах, где требуется анализ спектров, свободных от узких линий или «тонкой» структуры, такого разрешения вполне достаточно. В частности, малогабаритные спектрометры с клиновидным фильтром и многоэлементными приемниками могут найти применение в пирометрии спектрального отношения, а также, например, при анализе спектров диффузного отражения различных объектов органического происхождения, например, в приборах для определения влажности и содержания клетчатки в зерне или для контроля качества и сорта древесины.

### Заключение

Исследованы фотоэлектрические параметры многоэлементных приемников на основе поликристаллических слоев твердых растворов селенид свинца – селенид кадмия. Введением CdSe в твердый раствор удастся варьировать ширину запрещенной зоны полупроводникового материала, изменяя тем самым область спектральной чувствитель-

ности фотоприемника. Получены 48-элементные фотогальванические приемники со средним значением удельной обнаружительной способности  $D^* \approx 1,23 \cdot 10^{10} \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$  и относительным средним квадратичным отклонением 21%.

Линейные многоэлементные приемники на основе поликристаллических слоев  $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se}$  в совокупности с клиновыми узкополосными фильтрами, оснащенные соответствующей схемой обработки и усиления сигналов, представляют собой перспективные оптоэлектронные компоненты для создания малогабаритных быстродействующих спектрометрических модулей и спектрально-аналитических приборов на их основе.

### Литература

1. Певцов Е., Чернокожин В. Матричные ИК приемники для малогабаритных тепловизионных камер // Электронные компоненты. – 2001. – № 1. – С. 32–37.
2. Тропина Н.Э., Петровская З.Н., Черноглазова И.О. Влияние диэлектрической фазы на спектр фотолюминесценции фрактально структурированных нанокompозитных пленок селенида свинца // ФТП. – 2009. – № 43. – С. 1477–1480.
3. Варфоломеев С.П., Мазина Н.Э. Иммерсионный фотогальванический приемник ИК излучения с малоразмерным фоточувствительным элементом для датчика перегрева букс // Датчики и системы. – 2006. – № 6. – С. 22–25.
4. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. – М.: Наука, 1976.
5. Демин А.П., Нагулин Ю.С. Выбор ширины элемента многоэлементного линейного фотоприемника для регистрации линейчатых спектров // ОМП. – 1990. – № 9.

*Тропина Наталья Эдуардовна*

– Научно-исследовательский институт «ГИРИКОНД», магистр техники и технологий, соискатель, Mazina\_ne@mail.ru.