

УДК 621.315.592; 621.315.51.6; 621.3.049.77.14

ВЛИЯНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ YLP-ЛАЗЕРА НА ВОЛЬТ-ФАРАДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ КРЕМНИЙ-ДВУОКИСЬ КРЕМНИЯ

Р.А. Халецкий, Фам Куанг Тунг

Приводятся результаты эксперимента, связанного с облучением термически окисленной кремниевой пластины импульсным волоконным YLP-лазером с длиной волны 1,06 мкм с различной плотностью мощности излучения. Показано, что при плотности мощности лазерного излучения ниже плотности мощности, необходимой для расплавления кремния, в окисле появляются структурные дефекты, которые приводят к увеличению отрицательного заряда в объеме диэлектрика и увеличению проводимости SiO₂ при определенных значениях напряжения смещения на затворе.

Ключевые слова: структурный дефект, лазерное облучение, вольт-фарадная характеристика, система Si-SiO₂.

Введение

Лазерная обработка различных материалов электронной техники является интересным и перспективным научно-технологическим направлением, что обусловлено возможностью разнообразно изменять свойства материалов благодаря широкому диапазону изменения энергетических и временных режимов лазерного облучения. Кремний как один из основных полупроводниковых материалов современной микроэлектроники представляет особый интерес для изучения влияния лазерного излучения на свойства структур на его основе. К настоящему времени имеется большое количество работ, посвященных воздействию различных видов лазера на кремний [1, 2]. Однако не сообщается об исследованиях, связанных с воздействием лазерного излучения на структуру Si-SiO₂, имеющем огромное значение в кремниевой планарной технологии.

В настоящей работе рассматривается взаимодействие лазерного излучения с термически окисленной пластиной монокристаллического кремния. Целью работы являлось исследование влияния лазерного излучения на электрофизические свойства системы кремний-окисел.

Условия эксперимента

В качестве подложки экспериментальной структуры использовалась кремниевая пластина КЭФ-4,5 с кристаллографической ориентацией (100), на поверхности которой была термически выращена пленка двуокси кремния толщиной 100 нм. С обратной стороны кремниевой пластины окисел стравливался для создания омического контакта к полупроводнику.

Часть поверхности окисленной пластины подвергалась сканированию волоконным YLP-лазером с длиной волны 1,06 мкм. Частота следования лазерных импульсов составляла 200 Гц. На рис. 1 упрощенно показана схема сканирования лазерным пучком поверхности образца. Из рисунка видно, что распределение плотности мощности излучения по площади обрабатываемой поверхности не является постоянной величиной вследствие расфокусировки лазерного пучка при его отклонении от оси оптической системы. При этом очевидно, что плотность мощности достигает максимального значения P_{\max} в области облучения, нормаль к которой совпадает с осью пучка, и минимального значения P_{\min} на периферийных участках облучения.

В результате эффекта расфокусировки различные участки облученной области были подвергнуты воздействию лазера с различной плотностью мощности и, следовательно, с различным характером структурных нарушений. Зоны, подвергнутые облучению с плотностью мощности, соответствующей энергии, необходимой для расплавления кремния, наблюдались невооруженным глазом в виде сильно разработанных («вспаханных») участков поверхности. На периферийных участках облученной области видимых структурных нарушений не наблюдалось.

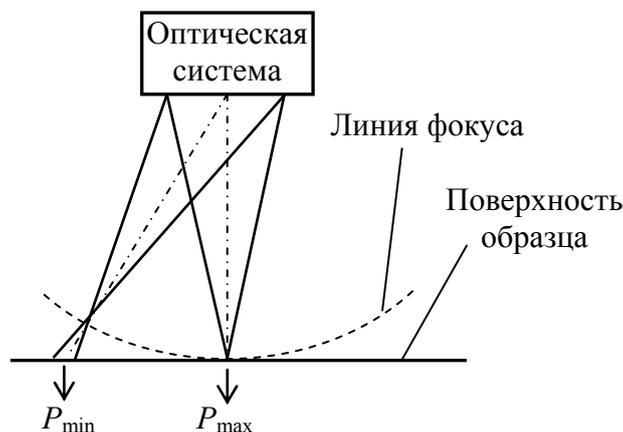


Рис. 1. Упрощенная схема эксперимента

После лазерного облучения производились измерения высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ) необлученных участков поверхности экспериментальной структуры и участков, подвергнутых воздействию лазера с мощностью P_{\max} и P_{\min} . В качестве материала затвора на поверхности пленки двуокиси кремния использовался InGa. Для определения исходной плотности фиксированного заряда в окисле Q_f , который появляется непосредственно после термического окисления кремния, был произведен расчет теоретической ВФХ идеальной МОП-структуры с параметрами, соответствующими параметрам экспериментальной структуры. Исходный фиксированный заряд рассчитывался по сдвигу ΔU_{MG} ВФХ реальной структуры относительно расчетно-теоретической ВФХ с помощью формулы

$$Q_f = C_0 \Delta U_{MG},$$

где C_0 – удельная емкость окисла; ΔU_{MG} – сдвиг по оси напряжений на уровне емкости, соответствующем такому энергетическому состоянию поверхности кремния, при котором происходит пересечение уровня Ферми с серединой запрещенной зоны кремниевой подложки. Исходная плотность фиксированного заряда в окисле образца составила около $+140$ нКл/см². Под фиксированным зарядом понимается заряд, величина которого не зависит от значения поверхностного потенциала кремниевой подложки. Природа фиксированного заряда связывается с наличием структурных дефектов в пленке SiO₂ [3].

Результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны типичные ВФХ, измеренные на необлученных участках поверхности образца и участках, подвергнутых воздействию лазера с минимальной плотностью мощности. На участках, облученных с максимальной плотностью мощности, ВФХ не регистрируются из-за отсутствия диэлектрической пленки SiO₂, которая разрушалась при расплавлении кремния в момент воздействия лазерного импульса. Из рисунка видно, что в результате воздействия лазерного излучения с плотностью мощно-

сти P_{\min} (рис. 1) происходит изменение ВФХ, что свидетельствует об изменении заряда в окисле экспериментальной структуры. Параллельный сдвиг ВФХ по оси напряжений связан с изменением плотности фиксированного заряда в окисле ΔQ_f .

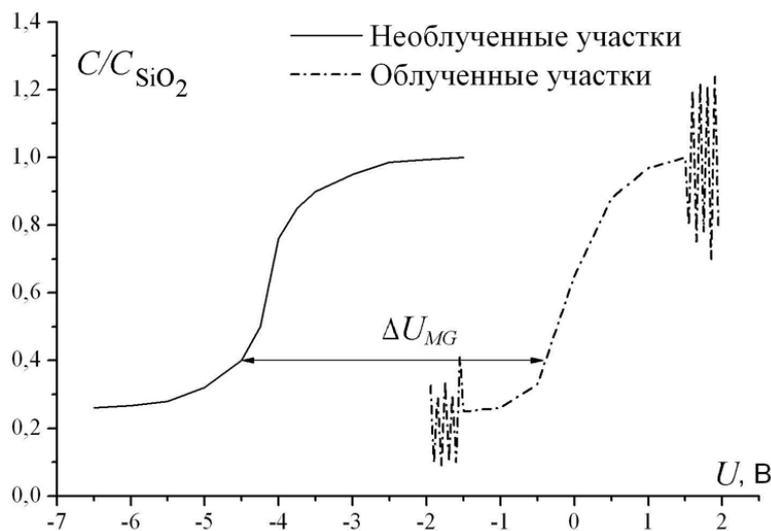


Рис. 2. Типичные вольт-фарадные характеристики для облученных с минимальной плотностью мощности P_{\min} и необлученных участков образца

Сдвиг ВФХ происходит без изменения наклона графика в диапазоне напряжений, соответствующем переходу МОП-структуры из режима инверсии (нижнее плато) в режим обогащения (верхнее плато). Этот факт свидетельствует о том, что на границе раздела Si–SiO₂ не происходит генерации электрически активных поверхностных дефектов, характерных для воздействия ионизирующих излучений [4].

Сдвиг ВФХ вправо, вызванный лазерным воздействием, соответствует уменьшению исходного положительного заряда в окисле на величину 150 нКл/см². При этом изменение заряда может быть вызвано как уменьшением исходных структурных дефектов, обуславливающих этот заряд, так и появлением новых дефектов, способных заряжаться отрицательно. Из представленного на рис. 2 графика видно, что на облученных участках при напряжениях $U > +1,5$ В и $U < -1,5$ В наблюдаются резкие флуктуации емкости. Такое поведение характеристики объясняется появлением утечки в пленке SiO₂. Увеличение проводимости связано с появлением новых структурных дефектов, обуславливающих увеличение отрицательного заряда в пленке.

Возможным механизмом протекания тока через диэлектрическую пленку окисла является «прыжковый» механизм [5], при котором дефекты, индуцированные лазером, играют роль ловушек, способных обмениваться носителями заряда между собой. Вследствие такого обмена под действием электрического поля носители, инжектированные в диэлектрик из кремниевой подложки, перемещаются в направлении верхнего электрода.

Заключение

Показано, что при воздействии импульсного волоконного YLP-лазера в окисле индуцируются дефекты, которые приводят к существенному изменению плотности фиксированного заряда отрицательной полярности. Этот эффект сопровождается появлением при определенных условиях проводимости диэлектрической пленки окисла. При этом механизм протекания тока через SiO₂ имеет выраженный активационный ха-

рактер. Для выяснения структуры дефектов, индуцированных лазером, и их локализации в окисле требуется проведение дополнительных структурных исследований.

Литература

1. Metev S.M., Veiko V.P. Laser assisted microtechnology. – Springer–Verlag, Heidelberg, 1994 (first edition), 1998 (second edition). – P. 295–329.
2. Magaya J., Sklyarov A., Mikaylichenko K., Yakovlev V. Silicon dioxide thin film removal using high–power nanosecond lasers // Applied Surface Science. – 2003. – V. 207. – P. 306–313.
3. Барабан А.П., Булавинов В.В., Коноров П.П. Электроника слоев SiO₂ на кремнии. – Л.: ЛГУ, 1988. – 304 с.
4. Гуртов В.А. Радиационные процессы в структурах металл–диэлектрик–полупроводник: Учебное пособие. – Петрозаводск, 1988. – 96 с.
5. Сорокин Л.М., Григорьев Л.В., Калмыков А.Е., Соколов В.И. Исследование структурных свойств и токового транспорта в нанокompозите, сформированном на поверхности кремния посредством окисления пористого кремния // ФТТ. – 2005. – Т. 47. – Вып. 7. – С. 1316–1322.

- Халецкий Роман Александрович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, halecky@yandex.ru
- Фам Куанг Тунг* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, quang_tung@yahoo.com

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, NO₂, CO, CO₂, 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_{1-x}Cd_xSe, 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.

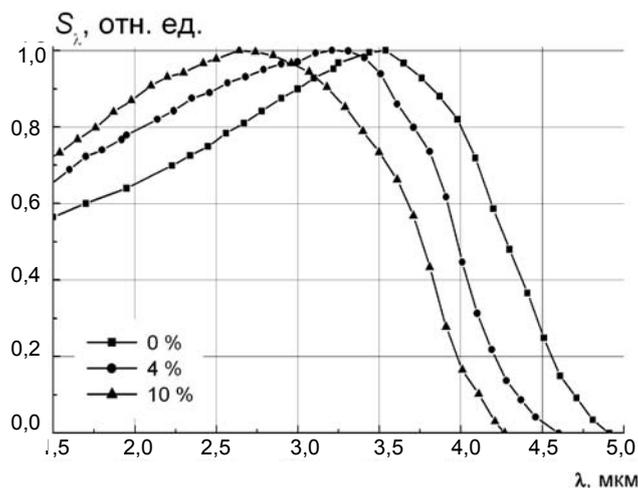


Рис. 1. Спектральное распределение чувствительности фотоприемников в зависимости от концентрации CdSe в твердом растворе $Pb_{1-x}Cd_xSe$

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 1000×1000 мкм² и 2000×2000 мкм² становится проблематичным. В статье [3] представлены результаты работы по миниатюризации дискретного фотогоальванического элемента до размеров 250×250 мкм². 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^{1/2}Вт⁻¹. 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.

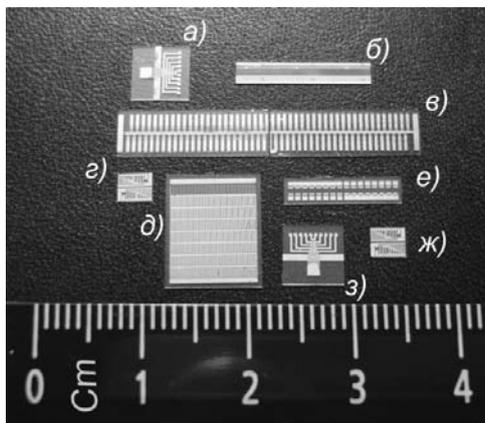


Рис. 2. Различные топологии многоэлементных приемников

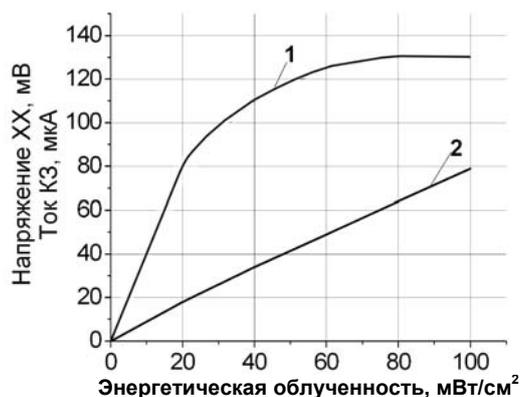


Рис. 3. Вольт- (1) и ампер-ваттная (2) характеристика фотогальванического приемника

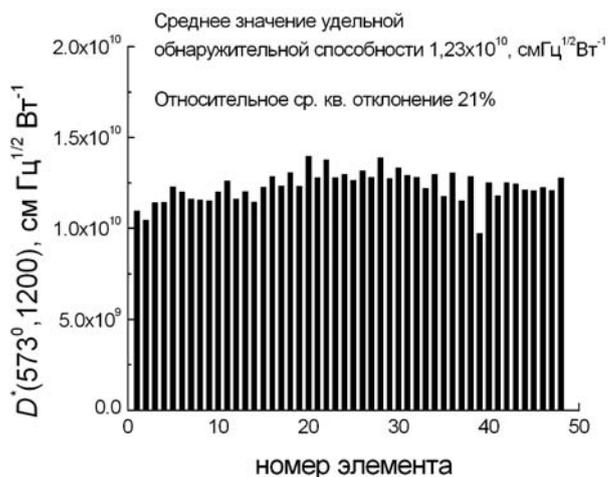


Рис. 4. Топограмма удельной обнаружительной способности линейной 48-элементной структуры

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 Δ – 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 Δ 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 λ_{\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.

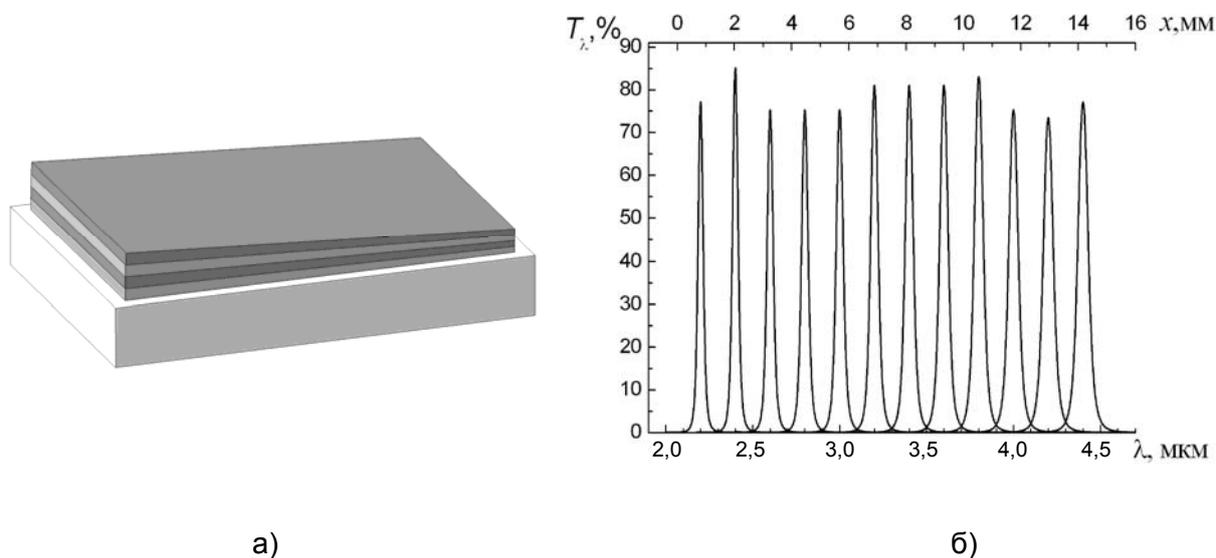


Рис. 5. Клиновидное многослойное покрытие (а) и спектры пропускания фильтра (б) (x – расстояние от края фильтра)

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 чувстви-

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.