

УДК 538.958

1.3.8 – Физика конденсированного состояния (технические, физико-математические науки)

## Оптические свойства нанокompозитных плёнок PbS-CdS

Ю. А. Белых, Р. М. Закирова, И. В. Федотова

Удмуртский государственный университет, Россия, 426034, Ижевск, ул. Университетская, 1

**Аннотация.** Методом высокочастотного магнетронного распыления получены нанокompозитные плёнки PbS-CdS с разными толщинами слоёв сульфида кадмия. Изучена структура данных плёнок методом рентгенофазового анализа и комбинационного рассеяния света. По оптическим спектрам пропускания определены значения толщины плёнок, эффективного показателя преломления и эффективной оптической ширины запрещённой зоны. Для нанокompозитных плёнок  $\{PbS_5CdS_{12}\}_{265}$  в среднем инфракрасном диапазоне при 2.5 мкм наблюдается окно прозрачности. Варьируя толщину слоёв сульфида свинца и сульфида кадмия, существует возможность получать структуры с окном прозрачности в средней ИК области.

**Ключевые слова:** нанокompозитные плёнки, оптические спектры пропускания, инфракрасные спектры пропускания, сульфид свинца, сульфид кадмия.

✉ Юлия Белых, e-mail: [belykh.yu.a@mail.ru](mailto:belykh.yu.a@mail.ru)

## Optical properties of nanocomposite PbS-CdS films

Yu. A. Belykh, R. M. Zakirova, I. V. Fedotova

Udmurt State University (1, Universitetskaya St., Izhevsk, 426034, Russian Federation)

**Summary.** Nanocomposite PbS-CdS films with varying thicknesses of cadmium sulfide layers and a constant thickness of a lead sulfide layer were obtained by high-frequency magnetron sputtering. The structure of the films was studied by X-ray phase analysis and Raman spectroscopy. PbS-CdS films were polycrystalline with a predominant orientation of cadmium sulfide crystallites along the direction [111] perpendicular to the plane (111). The Raman spectra of PbS-CdS nanocomposite films contained lines at 300, 600, 900, and 1200  $cm^{-1}$ , which corresponded to the vibrational modes 1LO, 2LO, 3LO, and 4LO of cadmium sulfide. No pronounced peaks belonging to lead sulfide were detected. The optical transmission spectra were used to determine the thickness of the films, the effective refractive index, and the effective optical band gap. The refractive index decreased from 2.50 to 2.25 with increasing CdS content in these films. The effective band gap of PbS-CdS nanocomposite films was in the range of 2.26 – 2.42 eV, which is close to the band gap of cadmium sulfide. The ratio of the oscillator energy to the band gap  $E_0/E_g$  indicates the nanocrystallinity of the obtained samples. For nanocomposite films  $\{PbS_5CdS_{12}\}_{265}$ , a transparency window is observed in the mid-infrared range at 2.5 microns, which is probably due to interference. By varying the thickness of the lead sulfide and cadmium sulfide layers, it is possible to obtain structures with a transparency window in the mid-IR region.

**Keywords:** nanocomposite films, optical transmission spectra, infrared transmission spectra, lead sulfide, cadmium sulfide.

✉ Yuliya Belykh, e-mail: [belykh.yu.a@mail.ru](mailto:belykh.yu.a@mail.ru)

## ВВЕДЕНИЕ

Сульфид свинца, благодаря простоте технологии нанесения тонких поликристаллических плёнок, широко применяется для изготовления устройств в инфракрасной (ИК) области спектра. Интерес представляет создание ИК датчиков на основе квантовых точек сульфида свинца [1]. Однако из-за современных тенденций перехода в наномир, обнаруживается проблема нестабильности наночастиц сульфида свинца. Для решения данной проблемы наночастицы узкозонного сульфида свинца покрывают оболочкой из широкозонного полупроводника, например, ZnS [2].

Гетерофазность структуры является важным фактором, влияющим на свойства материалов и их функциональные характеристики. Изучение гетерофазных структур может помочь в создании материалов для различных промышленных и научных приложений, обладающих параметрами, которые невозможно получить в однофазных системах [3]. Гетерофазный полупроводник на основе CdS-PbS должен быть чувствителен к разным спектральным диапазонам излучения, причем, на фотоэлектрические и оптические свойства материала существенно влияет соотношение этих фаз. Рассмотрение влияния увеличения размеров матрицы широкозонного полупроводника сульфида кадмия на оптические свойства

получаемых нанокompозитов является актуальной задачей для создания перспективных материалов с управляемыми характеристиками, используемых в оптоэлектронике, фотонике и сенсорных устройствах.

Формирование частиц сульфида свинца (ширина запрещенной зоны 0.41 эВ) нанометровых размеров в матрице широкозонного сульфида кадмия (ширина запрещенной зоны 2.40 эВ) позволит варьировать значения эффективной ширины запрещенной зоны и диапазоны спектральной чувствительности. Большинство подобных структур получают различными химическими [4, 5] и физическими методами [6, 7] осаждения. Наиболее распространённым физическим методом является магнетронное распыление.

Исследования технологий, позволяющих синтезировать нанокompозитные структуры PbS-CdS с контролируемым содержанием соответствующих фаз, является актуальной задачей.

Целью данной работы является исследование нового подхода, позволяющего синтезировать нанокompозитные плёнки PbS-CdS с контролируемым содержанием соответствующих фаз методом ВЧ магнетронного напыления. Исследуется фазовый состав и спектры пропускания оптического и среднего ИК диапазона нанокompозитных плёнок PbS-CdS, полученных высокочастотным (ВЧ) магнетронным распылением.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Тонкие нанокompозитные плёнки PbS-CdS были получены методом ВЧ магнетронного напыления в атмосфере аргона на модернизированной установке Катод-1М [8]. Осаждение производили на предметные стёкла толщиной 1.8 мм при температуре конденсации 200 °С, рабочем давлении в камере 0.36 Па. Подложки поочерёдно проходили заданное число раз над магнетронами с мишенями из сульфида свинца и сульфида кадмия.

В работе [9] сообщают, что при магнетронном напылении скорость роста является постоянной величиной и зависит в основном от мощности разряда магнетрона. Согласно [10], зная скорость магнетронного напыления при определённом режиме, рассчитывается время, при котором образуется конденсат необходимой толщины.

Поэтому в данной работе предварительно определяли толщину слоя сульфидов при прохождении подложек над мишенями за 1 проход. Для этого напыляли плёнки каждого сульфида металла при прохождении над мишенью за 1000 проходов. Измеряли толщину полученных плёнок, делили на 1000 и получали среднюю толщину слоя сульфида металла за 1 проход (скан). В зависимости от количества сканов имеется возможность получать островковые или сплошные слои. Формирование нанокompозитных плёнок подразумевает получение многофазных плёнок, в которых одна из фаз имеет нанометровые размеры в одном, двух или трёх измерениях. Для получения нанокompозитных плёнок PbS-CdS были выбраны следующие предполагаемые толщины слоёв: сульфид свинца – 5 Å, сульфид кадмия – 12, 24, 36, 72 Å, количество пар слоёв PbS и CdS – 265, 155, 110 и 58, соответственно. Суммарная расчётная толщина плёнок составила ~ 4500 Å. Следует отметить, что существует большая погрешность при определении толщины сверхтонких плёнок. Однако, учитывая неизменность технологических параметров, применяемых в нашей работе, можно считать, что толщины слоёв соответствуют предполагаемым.

В результате получены нанокompозитные плёнки следующих составов:  $\{\text{PbS}_5\text{CdS}_{12}\}_{265}$ ,  $\{\text{PbS}_5\text{CdS}_{24}\}_{155}$ ,  $\{\text{PbS}_5\text{CdS}_{36}\}_{110}$ ,  $\{\text{PbS}_5\text{CdS}_{72}\}_{58}$ .

Толщину образцов измеряли с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4.

Исследования структуры данных плёнок проводили на автоматизированном дифрактометре ДРОН-3.0 на Fe-K $\alpha$  ( $\lambda = 1.9373$  Å) излучении в диапазоне брэгговских углов  $2\theta = 25 - 100^\circ$ . Идентификацию фаз проводили с помощью картотеки JCPDS.

Снятие спектров комбинационного рассеяния света (КРС) производили на научно-исследовательском комплексе Centaur U HR с целью уточнения их фазового состава. Режимы для разных плёнок выбирали таким образом, чтобы достичь оптимального соотношения сигнал/шум. Длина волны возбуждающего лазера составила 473 нм. Мощность лазера для

наноккомпозитных плёнок PbS-CdS составляла 20 мВт, время экспозиции 200 с. При исследовании плёнок CdS мощность лазера составляла 15 мВт, время экспозиции 60 с, а для плёнок PbS – 35 мВт, время экспозиции 300 с. При выбранных режимах фотодеградации исследованных образцов не наблюдалось.

Спектры пропускания снимали на спектрофотометре СФ-56 относительно воздуха в диапазоне длин волн 400 – 1100 нм и на ИК Фурье-спектрометре ФСМ-1201 в диапазоне 2200 – 5000 см<sup>-1</sup> (2.0 – 4.5 мкм), в качестве образца сравнения использовали стеклянную подложку. Выбор диапазонов обусловлен пропускной способностью подложек.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Толщина наноккомпозитных плёнок PbS-CdS в пределах погрешности имеет значения, близкие к заданной величине.

**Рентгенофазовый анализ.** Дифрактограммы плёнок PbS, CdS и исследуемых наноккомпозитных плёнок PbS-CdS представлены на рис. 1.

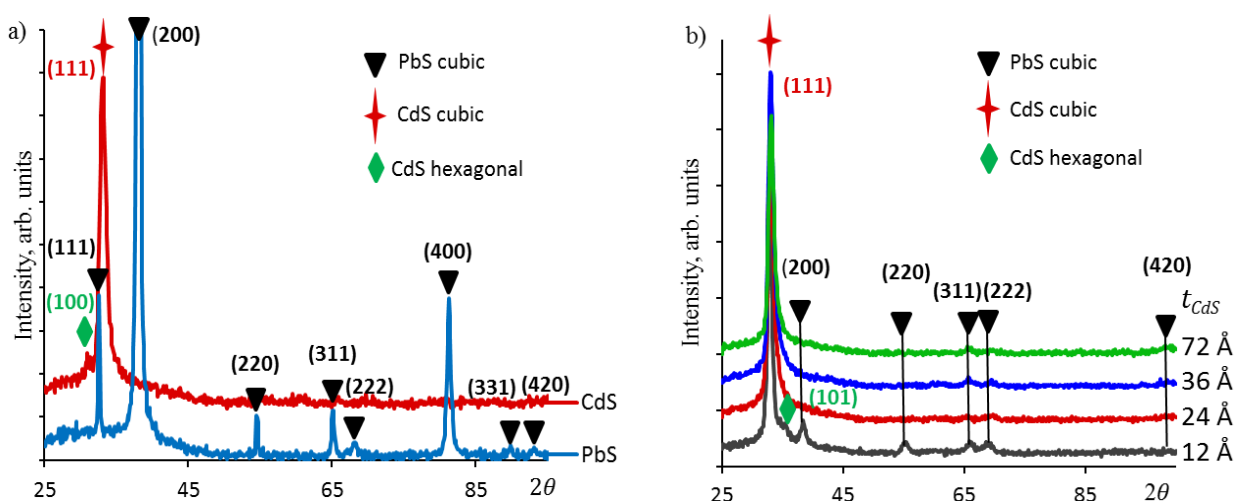


Рис. 1. Дифрактограммы: а) плёнок PbS и CdS; б) наноккомпозитных плёнок PbS-CdS

Fig. 1. Diffractograms: a) PbS and CdS films; b) PbS-CdS nanocomposite films

Плёнки сульфида кадмия являются поликристаллическими с преимущественной ориентировкой кристаллитов вдоль направления [111], перпендикулярном плоскости (111), о чём свидетельствует наличие одной интенсивной линии и несколько относительно слабых. Фазовый состав плёнки PbS соответствует сульфиду свинца кубической модификации, плёнки CdS содержат в своем составе 2 модификации: кубическую и гексагональную.

Для наноккомпозитных плёнок PbS-CdS на всех дифрактограммах наблюдается интенсивный дифракционный пик, который можно приписать отражению от плоскости (111) сульфида кадмия кубической модификации. Кроме того, на дифрактограмме плёнки  $\{PbS_5CdS_{12}\}_{265}$  наблюдается пик, соответствующий отражению от плоскости (101) CdS гексагональной модификации. В других плёнках возможно присутствие незначительного количества данной фазы, но на полученных дифрактограммах она не проявляется из-за интенсивного широкого пика кубического CdS.

На дифрактограмме образца  $\{PbS_5CdS_{12}\}_{265}$  присутствуют слабые пики, соответствующие отражениям от плоскостей (200), (220), (311), (222), (420) сульфида свинца. С увеличением толщины слоёв CdS, интенсивность данных отражений существенно снижается.

**Спектроскопия комбинационного рассеяния света.** На спектрах КРС плёнок сульфида кадмия (рис. 2, а), полученных при длине волны возбуждения 473 нм, присутствуют линии при 300, 600, 900 и 1200  $\text{см}^{-1}$ , которые соответствуют колебательным модам 1LO, 2LO, 3LO, 4LO [11]. Съёмка в панорамном режиме плёнок сульфида кадмия выявила наличие широких люминесцентных полос с максимумами при  $\sim 520$  нм и  $\sim 720$  нм, связанные с дефектностью структуры плёнок (рис. 2, а, вставка). Пик люминесценции, приходящийся на длину волны  $\sim 720$  нм ( $\sim 2.39$  эВ), соответствует образованию вакансий серы, а пик на длине волны  $\sim 520$  нм ( $\sim 1.73$  эВ) соответствует образованию донорно-акцепторной пары  $[\text{V}_\text{S}^- - \text{V}_\text{Cd}^+]^0$  для нанокристаллических структур [12].

Спектры КРС сульфида свинца (рис. 2, а) содержат полосу на частоте  $\sim 460$   $\text{см}^{-1}$ , которая согласно авторам [13, 14] может соответствовать 2LO фонону в точке L зоны Бриллюэна.

На спектрах КРС нанокомпозитных плёнок PbS-CdS (рис. 2, б) наблюдаются только колебательные моды 1LO, 2LO, 3LO, 4LO сульфида кадмия. На всех спектрах КРС нанокомпозитных плёнок, кроме образца  $\{\text{PbS}_5\text{CdS}_{12}\}_{265}$ , присутствует люминесценция на тех же длинах волн, что и на спектрах плёнок CdS.

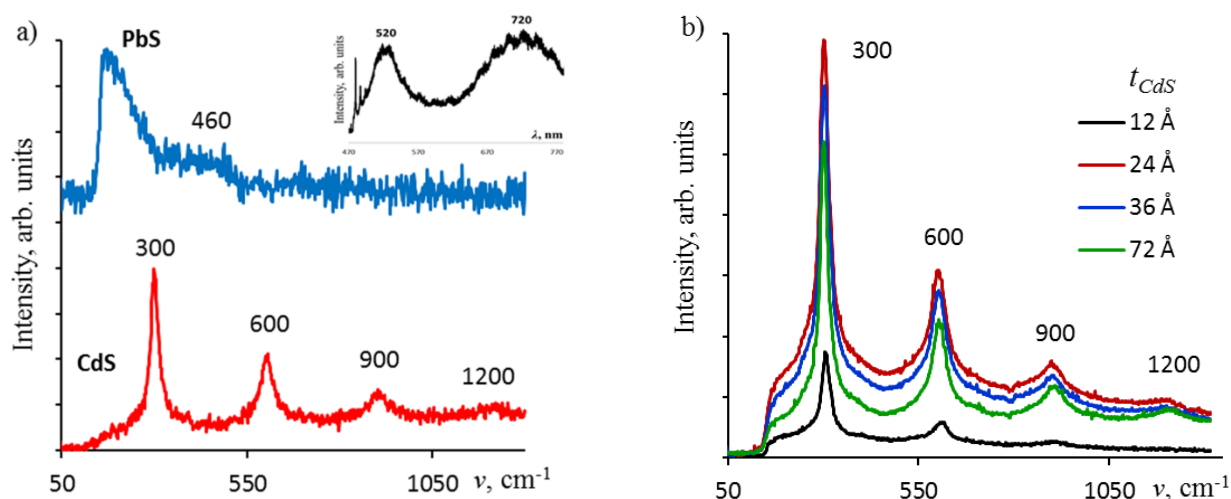


Рис. 2. Спектры КРС: а) плёнок PbS и CdS; б) нанокомпозитных плёнок PbS-CdS

Fig. 2. Raman spectra of: a) PbS and CdS films; b) nanocomposite PbS-CdS films

Спектроскопия КРС подтвердила результаты рентгенофазового анализа: твёрдые растворы не выявлены. Согласно [15] при 1203 К при совместном осаждении сульфидов кадмия и свинца могут образоваться гетерофазные композиции, состоящие из широкозонной матрицы и узкозонных включений.

**Оптическая спектрофотометрия.** Спектры пропускания оптического диапазона длин волн нанокомпозитных плёнок PbS-CdS представлены на рис. 3, а. Нанокомпозитные плёнки, с толщинами слоёв CdS 72, 36, 24 Å являются прозрачными, пропускание  $\sim 75$  %. При толщине слоёв CdS 12 Å пропускание снижается, край поглощения становится более пологим.

Для оценки эффективной оптической ширины запрещённой зоны определяли коэффициент поглощения плёнки ( $\alpha(\lambda)$ ) с учетом поглощения и двукратного отражения [16]:

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{d} \ln \frac{(1 - R(\lambda))^2}{T(\lambda)}. \quad (1)$$

Согласно [17] зависимость коэффициента фундаментального оптического поглощения  $\alpha(h\nu)$  связана с оптической шириной запрещенной зоны ( $E_g^{opt}$ ) соотношением

$$\alpha(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g^{opt})^{1/r}}{h\nu}. \quad (2)$$

где  $A$  – константа,  $h\nu$  – энергия квантов света,  $r$  – фактор оптического перехода. Наилучшие результаты при построении спектров оптического поглощения, выполненные в координатах Тауца (рис. 3, b), получены при аппроксимации зависимостей данного выражения для  $r = 2$ . Это соответствует прямым разрешённым переходам.

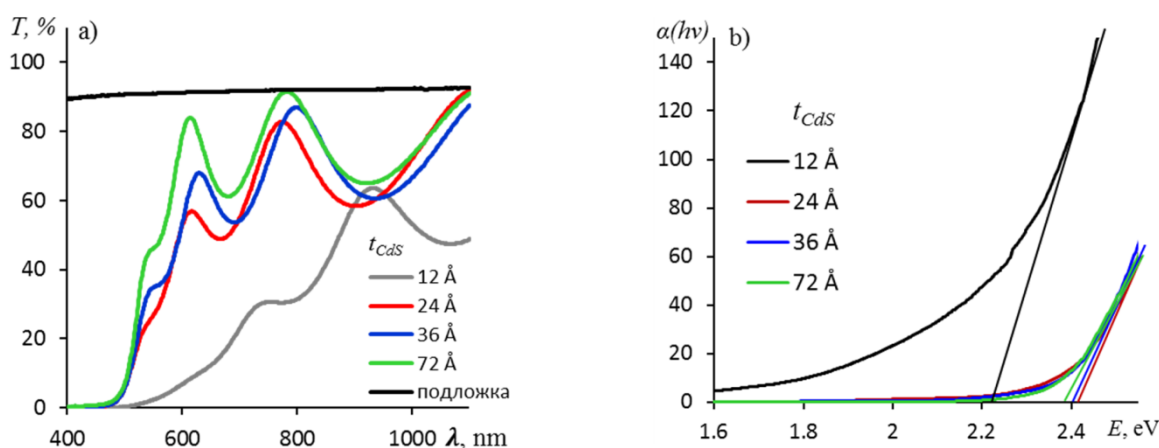


Рис. 3. Спектры пропускания нанокomпозитных плёнок PbS-CdS в оптическом диапазоне (a), эффективная оптическая ширина запрещенной зоны (b)

Fig. 3. Transmission spectra of PbS-CdS nanocomposite films in the optical range (a), effective optical band gap (b)

Эффективная ширина запрещенной зоны  $E_g$  нанокomпозитных плёнок PbS-CdS с толщиной слоёв CdS 24, 36 и 72 Å соответствует 2.42, 2.39, 2.38 эВ. Для образца  $\{\text{PbS}_5\text{CdS}_{12}\}_{265}$  эффективная ширина запрещенной зоны равна 2.26 эВ.

Ширина запрещенной зоны объёмного сульфида свинца составляет 0.41 – 0.42 эВ, для сульфида кадмия кубической модификации 2.40 эВ, а для сульфида кадмия гексагональной модификации 2.58 эВ [18, 19].

По спектрам пропускания была уточнена общая толщина плёнок и рассчитана дисперсия показателя преломления по методикам [20 – 22]. Для аппроксимации дисперсии показателя преломления получено выражение:

$$n(\lambda) = n_0 + \frac{B}{\lambda} + \frac{C}{\lambda^2} + \frac{D}{\lambda^2 - 167^2} + \frac{E}{\lambda^2 - 20000^2} + \frac{F}{\lambda^3}. \quad (3)$$

где  $n_0, B, C, D, E, F$  – некоторые константы.

Для проверки полученных значений решалась прямая задача спектрофотометрии. С полученными значениями показателя преломления, коэффициента экстинкции и толщины плёнок строился теоретический спектр пропускания  $T(\lambda)$  [20]. Теоретический спектр сравнивался с экспериментальным спектром. В качестве критерия сходимости результатов расчёта с экспериментальными спектрами использовали функцию невязки:

$$f = \sum_{n=1}^N (T_{exp} - T_{teor})^2. \quad (4)$$

Результаты расчётов приведены в табл. 1.

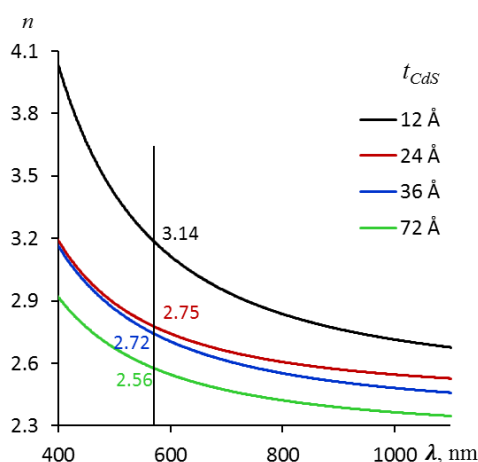
**Таблица 1. Результаты расчетов оптических констант нанокomпозитных плёнок PbS-CdS**

Table 1. Results of calculations of optical constants of nanocomposite PbS-CdS films

Films	$n_0$	$B$	$C$	$D$	$E$	$F$	$d, \text{Å}$	$f$
{PbS <sub>5</sub> CdS <sub>12</sub> } <sub>265</sub>	2.500	7.97	0	$2 \cdot 10^5$	$10^5$	-2.5714	5000	0.084
{PbS <sub>5</sub> CdS <sub>24</sub> } <sub>155</sub>	2.436	10.00	0	$9.59 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$	$10^5$	4400	0.026
{PbS <sub>5</sub> CdS <sub>36</sub> } <sub>110</sub>	2.340	30.00	60190	$4.9 \cdot 10^4$	$10^4$	8500	4660	0.051
{PbS <sub>5</sub> CdS <sub>72</sub> } <sub>58</sub>	2.253	20.00	50000	$4 \cdot 10^4$	$10^4$	8500	4840	0.073

Рассчитанные по спектрам пропускания и полученные с помощью формулы (3) зависимости показателя преломления исследованных плёнок представлены на рис. 4.

С увеличением толщины слоёв сульфида кадмия показатель преломления на длине волны 589.3 нм приближается к показателю преломления объёмного CdS. Согласно [23] при длине волны 589.3 нм для CdS гексагональной модификации  $n = 2.506 - 2.512$ , а для кубической модификации  $n = 2.498 - 2.505$ . В работе [24] для PbS получено значение показателя преломления 4.9 – 5.2.



**Рис. 4. Дисперсия показателя преломления нанокomпозитных плёнок PbS-CdS**

Fig. 4. Refractive index dispersion of PbS-CdS nanocomposite films

По одноосцилляторной модели [25, 26] была рассчитана энергия осциллятора  $E_0$  и дисперсионная энергия  $E_d$  для каждого образца (табл. 2). В работе [25] для плёнок CdS энергия одного осциллятора  $E_0 \approx 2E_g$ . Отношение  $E_0/E_g$  меньше 2, что свидетельствует о наноструктурировании образцов [27]. Наши результаты согласуются с работой [28]. А значения дисперсионной энергии близки к значениям работы [25].

**Таблица 2. Энергия осциллятора  $E_0$  и дисперсионная энергия  $E_d$**

Table 2. Oscillator energy  $E_0$  and dispersion energy  $E_d$

Film	$E_0, \text{eV}$	$E_d, \text{eV}$	$E_g, \text{eV}$	$E_0/E_g$
{PbS <sub>5</sub> CdS <sub>12</sub> } <sub>265</sub>	3.29	18.21	2.26	1.46
{PbS <sub>5</sub> CdS <sub>24</sub> } <sub>155</sub>	4.22	21.19	2.42	1.74
{PbS <sub>5</sub> CdS <sub>36</sub> } <sub>110</sub>	3.92	18.31	2.39	1.64
{PbS <sub>5</sub> CdS <sub>72</sub> } <sub>58</sub>	4.16	17.50	2.38	1.75

**Инфракрасная спектроскопия.** ИК пропускание в диапазоне длин волн 2 – 4.5 мкм плёнок сульфида кадмия выше, чем пропускание плёнок сульфида свинца (рис. 5, а). Пропускание плёнки PbS при 2.2 мкм имеет максимум ~ 60 %. С увеличением длины волны пропускание плавно снижается до ~ 35 %. Плёнки CdS более прозрачные, при 2 мкм пропускание ~ 90 – 95 %, с увеличением длины волны также снижается до ~ 75 %.

На ИК спектрах пропускания (рис. 5, b) нанокomпозитных плёнок  $\{PbS_5CdS_{12}\}_{265}$ , при ~ 2.5 мкм наблюдается наличие области с пропусканием ~ 95 – 100 % (так называемое окно прозрачности). С увеличением толщины слоёв CdS максимум пропускания смещается в сторону коротких длин волн. Наблюдаемый максимум связан с явлением интерференции в системе плёнка-подложка.

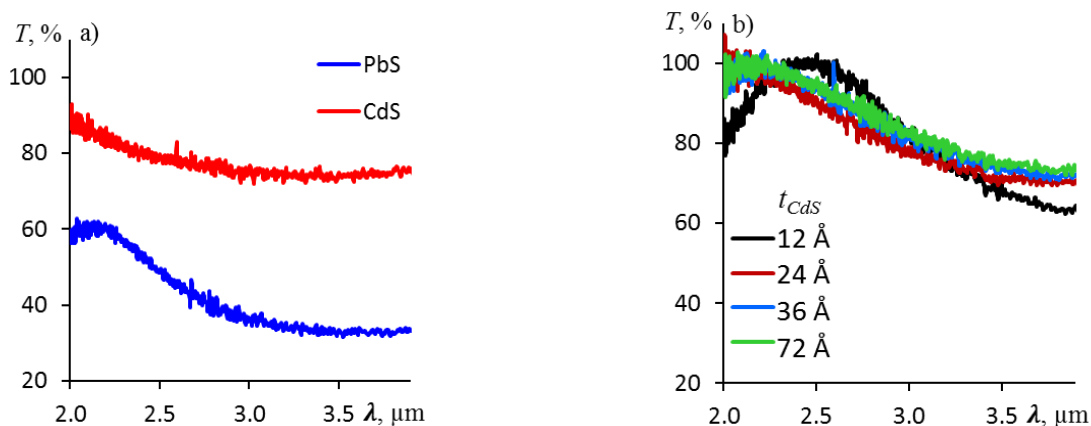


Рис. 5. ИК спектры пропускания: а) плёнок PbS и CdS; б) нанокomпозитных плёнок PbS-CdS

Fig. 5. IR transmission spectra of: a) PbS and CdS films; b) nanocomposite PbS-CdS films

## ВЫВОДЫ

Изучен новый подход получения нанокomпозитных плёнок PbS-CdS с контролируемым содержанием фаз с помощью ВЧ магнетронного распыления.

Плёнки PbS-CdS являются поликристаллическими с преимущественной ориентировкой кристаллитов сульфида кадмия вдоль направления [111], перпендикулярном плоскости (111).

На спектрах КРС нанокomпозитных плёнок PbS-CdS присутствуют линии при 300, 600, 900 и 1200  $cm^{-1}$ , которые соответствуют колебательным модам 1LO, 2LO, 3LO, 4LO сульфида кадмия. Ярко выраженных пиков, принадлежащих сульфиду свинца, не выявлено. На всех спектрах КРС нанокomпозитных плёнок, кроме образца  $\{PbS_5CdS_{12}\}_{265}$ , присутствуют широкие полосы люминесценции с максимумами на длинах волн ~ 520 нм и ~ 720 нм.

По оптическим спектрам пропускания определены значения толщины и эффективного показателя преломления нанокomпозитных плёнок PbS-CdS. Показатель преломления уменьшается от 2.50 до 2.25 при увеличении содержания CdS в данных плёнках. Эффективная ширина запрещенной зоны нанокomпозитных плёнок PbS-CdS составила 2.26 – 2.42 эВ, что близко к ширине запрещенной зоны сульфида кадмия. Отношение энергии  $E_0/E_g$  осциллятора к ширине запрещенной зоны свидетельствует о нанокристалличности полученных образцов.

В среднем ИК диапазоне выявлено наличие окна прозрачности для нанокomпозитных плёнок  $\{PbS_5CdS_{12}\}_{265}$  при 2.5 мкм. Исследование влияния состава нанокomпозитных плёнок PbS-CdS перспективно для разработки оптических фильтров ИК диапазона. Варьируя толщину слоёв сульфида свинца и сульфида кадмия, существует возможность получать структуры с окном прозрачности в средней ИК области.

**Работа проводилась на оборудовании ЦКПП Инжинирингового центра развития передовых технологий ФГБОУ ВО «УдГУ».**

*The work was carried out using the equipment of the Central Control and Research Center of the Engineering Center for the Development of Advanced Technologies of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Udmurt State University".*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуклов И. А., Токнова В. Ф., Демкин Д. В., Лапушкин Г. И., Николенко Л. М., Лизунова А. А., Бричкин С. Б., Василец В. Н., Разумов В. Ф. Новый подход к синтезу коллоидных квантовых точек сульфида свинца в смеси олеиламина и олеиновой кислоты // *Химия высоких энергий*. 2020. Т. 54, № 3. С. 200-205. <https://doi.org/10.31857/S0023119320030146>
2. Serrano T., Cavazos J. L., Peña Y., Gómez I. Synthesis and characterization of PbS/ZnS core/shell nanoparticles by microwave method // *Chalcogenide Letters*, 2014, vol. 11, no. 1, pp. 21–28.
3. Байбикова Д. Р., Сердобинцев А. А., Козловский А. В., Стецюра С. В. Исследование влияния соотношения компонентов в поликристаллической пленке PbS-CdS на морфологию поверхности, оптические и фотоэлектрические свойства // *Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей десятой Всероссийской научной школы-семинара*. 2023. Т. 10. С. 98–102.
4. Форостяная Н. А. Физико-химические закономерности получения твердых растворов в системе PbS-CdS путем ионообменной трансформации: дисс. ... канд. хим. наук. Екатеринбург, 2015. 196 с.
5. Маскаева Л. Н., Марков В. Ф. Определение периода кристаллической решетки и состава химически осажденных пленок твердых растворов замещения. Учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. 20 с.
6. Козловский А. В., Чуфарова Н. А., Байбикова Д. Р., Сердобинцев А. А., Стецюра С. В. Влияние соотношения компонентов в гетерогенном материале CdS-PbS на его фотоэлектрические характеристики и их стабильность во времени // *Физика и техника полупроводников*. 2023. Т. 57, № 8. С. 636–639. <https://doi.org/10.61011/FTP.2023.08.56959.5200C>
7. Роках А. Г. Сублимированные фотопроводящие пленки типа CdS: история и современность // *Известия Саратовского университета. Физика*. 2015. Т. 15, № 2. С. 53–58. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2015-15-2-53-58>
8. Алалыкин С. С., Закирова Р. М., Кобзиев В. Ф., Крылов П. Н., Федотова И. В. Формирование мультислойных структур ZnS/SiO<sub>2</sub> ВЧ магнетронным напылением на модернизированной установке Катод-1М // *Химическая физика и мезоскопия*. 2015. Т. 17, № 3. С. 360–363.

## REFERENCES

1. Shuklov IA, et al. (2020) A new approach to the synthesis of colloidal quantum dots of lead sulfide in a mixture of oleylamine and oleic acid. *High Energy Chemistry* 54(3): 183-188. <https://doi.org/10.1134/S0018143920030133>
2. Serrano T, et al. (2014) Synthesis and characterization of PbS/ZnS core/shell nanoparticles by microwave method. *Chalcogenide Letters* 11(1): 21–28.
3. Baybikova DR, et al. (2023) Issledovanie vliyaniya sootnosheniya komponentov v polikristallicheskoj plenke PbS-CdS na morfologiyu poverkhnosti, opticheskie i fotoelektricheskie svoystva [Study of the influence of the component ratio in a PbS-CdS polycrystalline film on surface morphology, optical, and photoelectric properties]. *Vzaimodeystvie sverkhvysokochastotnogo, teragertsovogo i opticheskogo izlucheniya s poluprovodnikovymi mikro- i nanostrukturami, metamaterialami i bioob'ektami: Sbornik statey desyatoy Vserossiyskoy nauchnoy shkoly-seminara*. [Interaction of ultra-high-frequency, terahertz, and optical radiation with semiconductor micro- and nanostructures, metamaterials, and biological objects: Collection of articles from the tenth All-Russian scientific school-seminar] 10: 98–102. (In Russian).
4. Forostyanaya NA (2015) *Fiziko-khimicheskiye zakonomernosti polucheniya tverdykh rastvorov v sisteme PbS-CdS putem ionoobmennoy transformatsii* [Physico-chemical patterns of obtaining solid solutions in the PbS-CdS system by ion exchange transformation]: diss. ... kand. khim. nauk. Yekaterinburg.
5. Maskaeva LN, Markov VF (2005) *Opredeleniye perioda kristallicheskoj reshetki i sostava khimicheskii osazhdennykh plenok tverdykh rastvorov zameshcheniya* [Determination of the crystal lattice period and composition of chemically deposited films of substitution solid solutions]. Yekaterinburg: House of Ural State Technical University-UPI Publ.
6. Kozlowsky AV, et al. (2024) Influence of components in a heterogeneous CdS-PbS material on photoelectric characteristics and their stability over time. *Semiconductors* 58(1): 34–37. <https://doi.org/10.1134/S1063782624010081>
7. Rokakh AG (2015) Sublimirovannyye fotoprovodyashchiye plenki tipa CdS: istoriya i sovremennost' [Sublimated photoconductive films of the CdS type: history and modernity]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Fizika* [News of Saratov University. Physics] 15(2): 53–58. (In Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2015-15-2-53-58>
8. Alalykin SS, et al. (2015) Formirovaniye mnogosloynnykh struktur ZnS/SiO<sub>2</sub> VCh magnitronnym napyleniyem na modernizirovannoy ustanovke Katod-1M [Formation of multilayer structures of ZnS/SiO<sub>2</sub> by RF magnetron sputtering on an upgraded Cathode-1M installation]. *Khimicheskaya fizika I mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy] 17(3): 360-363. (In Russian).

9. Ануфриев Л. П., Турцевич А. С., Глухманчук В. В., Соловьев Я. А., Баранов В. В. Исследование влияния условий формирования на свойства тонких пленок молибдена, нанесенных магнетронным распылением // Электронная обработка материалов. 2004. Т. 40, № 3. С. 70–74.
10. Томилин С. В. Влияние размерных эффектов на свойства электронной подсистемы металлических островковых пленок: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Симферополь, 2018. 177 с.
11. Trajčić J., Gilić M., Romčević N., Romčević M., Stanišić G., Hadžić B., Petrović M., Yahia Y. S. Raman spectroscopy of optical properties in CdS thin films // *Science of Sintering*, 2015, vol. 47, pp. 145–152. <https://doi.org/10.2298/SOS1502145T>
12. Кузнецова Ю. В. Влияние стабилизирующих оболочек на структурные характеристики и оптические свойства наночастиц сульфида кадмия: дисс. ... канд. хим. наук. Екатеринбург, 2019. 152 с.
13. Баранов А. В., Богданов К. В., Ушакова Е. В., Черевков С. А., Федоров А. В., Tschamtk S. Сравнительный анализ спектров комбинационного рассеяния макро- и нанокристаллов PbS // *Оптика и спектроскопия*. 2010. Т. 109, № 2. С. 301–305.
14. Ахмедов О. Р., Гусейналиев М. Г., Абдуллаев Н. А., Абдуллаев Н. М., Бабаев С. С., Касумов Н. А. Оптические свойства тонких пленок PbS // *Физика и техника полупроводников*. 2016. Т. 50, № 1. С. 51–54.
15. Кирсанов А. Ю., Марков В. Ф., Маскаева Л. Н. Прогнозирование состава твердых растворов  $Cd_xPb_{1-x}S$  моделированием процесса соосаждения сульфидов свинца и кадмия // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия»*. 2013. Т. 5, № 1. С. 35–39.
16. Стаськов Н. И., Сотский А. Б., Сотская Л. И., Ивашкевич И. В., Кулак А. И., Гапоненко Н. В., Руденко М. В., Петлицкий А. Н. Оптические характеристики пленок титаната стронция, полученных золь-гель методом // *Оптика и спектроскопия*. 2018. Т. 125, № 4. С. 473–478. <https://doi.org/10.21883/OS.2018.10.46697.69-18>
17. Зацепин А. Ф., Бирюков Д. Ю., Гаврилов Н. В., Штанг Т. В., Koubisy M. S., Парулин Р. А. Индуцированный квазидинамический беспорядок в структуре имплантированного ионами рения кварцевого стекла // *Физика твердого тела*. 2019. Т. 61, № 6. С. 1084–1099. <https://doi.org/10.21883/FTT.2019.06.47684.370>
18. Садовников С. И., Кожевникова Н. С., Гусев А. И. Оптические свойства наноструктурированных пленок сульфида свинца с кубической структурой типа  $D0_3$  // *Физика и техника полупроводников*. 2011. Т. 45, № 12. С. 1621–1632.
19. Гременок В. Ф., Зарецкая Е. П., Станчик А. В., Бускис К. П., Пашаян С. Т., Токмаджян А. С., Мусаелян А. С., Петросян С. Г. Исследование структурных и оптических свойств тонких пленок CdS в зависимости от времени химического осаждения // *Оптика и спектроскопия*. 2024. Т. 132, № 2. С. 161–168. <https://doi.org/10.61011/OS.2024.02.57775.5731-23>
9. Anufriev LP, et al. (2004) Issledovanie vliyaniya usloviy formirovaniya na svoystva tonkikh plenok molibdena, nanesennykh magnitronnym raspyleniem [Study of the influence of formation conditions on the properties of thin molybdenum films deposited by magnetron sputtering]. *Elektronnaya obrabotka materialov* [Electronic Processing of Materials] 40(3): 70–74. (In Russian).
10. Tomilin SV (2018) *Vliyanie razmernykh effektiv na svoystva elektronnoy podsystemy metallicheskiykh ostrovkovykh plenok* [The effect of size effects on the properties of the electronic subsystem of metallic island films]: diss. ... kand. fiz.-mat. nauk. Simferopol.
11. Trajčić J, et al. (2015) Raman spectroscopy of optical properties in CdS thin films. *Science of Sintering* 47: 145–152. <https://doi.org/10.2298/SOS1502145T>
12. Kuznetsova YuV (2019) *Vliyanie stabiliziruyushchikh obolochek na strukturnyye kharakteristiki i opticheskiye svoystva nanokhasnits sul'fida kadmiya* [Influence of stabilizing shells on the structural characteristics and optical properties of cadmium sulfide nanoparticles]: diss. ... kand. khim. nauk. Yekaterinburg.
13. Baranov AV, et al. (2010) Comparative analysis of Raman spectra of PbS macro- and nanocrystals. *Optics and Spectroscopy* 109(2): 268–271. <https://doi.org/10.1134/S0030400X10080199>
14. Akhmedov OR, et al. (2016) Optical properties of PbS thin films. *Semiconductors* 50(1): 50–53. <https://doi.org/10.1134/S1063782616010036>
15. Kirsonov AYu, Markov VF, Maskayeva LN (2013) Prognozirovanie sostava tverdykh rastvorov  $Cd_xPb_{1-x}S$  modelirovaniem protsessa soosazhdeniya sulfidov svintsa i kadmiya [Prediction of the composition of  $Cd_xPb_{1-x}S$  solid solutions by modeling the co-precipitation process of lead and cadmium sulfides]. *Vestnik YuUrGU. Seriya "Khimiya"* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Chemistry"] 5(1): 35–39. (In Russian).
16. Staskov NI, et al. AN (2018) Optical characteristics of strontium titanate films obtained by the sol-gel method. *Optics and Spectroscopy* 125(4): 492–498. <https://doi.org/10.1134/S0030400X18100247>
17. Zatsepin AF, et al. (2019) Induced quasi-dynamic disorder in the structure of rhenium ion-implanted quartz glass. *Physics of the Solid State* 61(6): 1017–1022. <https://doi.org/10.1134/S1063783419060301>
18. Sadovnikov SI, Kozhevnikova NS, Gusev AI (2011) Optical properties of nanostructured lead sulfide films with a  $D0_3$  cubic structure type. *Semiconductors* 45(12): 1559–1570. <https://doi.org/10.1134/S1063782611120116>
19. Gremenok VF, et al. (2024) Study of structural and optical properties of CdS thin films depending on chemical deposition time. *Optics and Spectroscopy* 132(2): 145–151. <https://doi.org/10.61011/EOS.2024.02.58449.5731-23>

20. Swanepoel R. J. Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon // *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1983, vol. 16, no. 12, pp. 1214–1222. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/16/12/023>
21. Юрковец Е. В. Разработка численно-аналитических методов исследования оптических констант пленок: дисс. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2019. 149 с.
22. Котликов Е. Н., Иванов В. А., Крупеников В. А., Таллерчик Б. А., Тропин А. Н. Исследование оптических констант халькогенидов мышьяка в области длин волн 0.5–2.5 мкм // *Оптика и спектроскопия*. 2007. Т. 103, № 6. С. 981–985.
23. Madelung O., Schulz M., Weiss H. *Landolt-Börnstein (New Series, Group III, Vol. 41, Subvolume B)* Springer-Verlag, 1987. 458 p.
24. Schoolar R. B., Dixon J. R. Optical constants of lead sulfide in the fundamental absorption region // *Physical Review*, 1965, vol. 137, no. 2A, pp. A667–A670. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.137.A667>
25. Петрусь Р. Ю., Ильчук Г. А., Кашуба А. И., Семкив И. В., Змийовська Е. О., Гончар Ф. М. Оптические свойства тонких пленок CdS // *Журнал прикладной спектроскопии*. 2020. Т. 87, № 1. С. 43–49.
26. Атаева С. У., Мехтиева С. И., Исаев А. И. Дисперсия показателя преломления халькогенидного стеклообразного полупроводника Se<sub>95</sub>Te<sub>5</sub>, легированного самарием // *Физика и техника полупроводников*. 2015. Т. 49, № 7. С. 971–974.
27. Мешалкин А. Ю. Фото- и электронно-стимулированные процессы в тонкопленочных структурах карбазол-содержащих полимеров и халькогенидных стекол: дисс. ... д-ра физ. наук. Кишинёв, 2025. 171 с.
28. Tepantlán C. S., González A. M. P., Arreola I. V. Structural, optical and electrical properties of CdS thin films obtained by spray pyrolysis // *Revista Mexicana de Física*, 2008, vol. 54, no. 2, pp. 112–117.
20. Swanepoel RJ (1983) Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon. *Journal of Physics E: Scientific Instruments* 16(12): 1214–1222. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/16/12/023>
21. Yurkovets EV (2019) *Razrabotka chislenno-analiticheskikh metodov issledovaniya opticheskikh konstant plenok* [Development of numerical and analytical methods for studying optical constants of films]: diss. ... kand. tekhn. nauk. Saint Petersburg.
22. Kotlikov EN, et al. (2007) Investigation of optical constants of arsenic chalcogenides in the wavelength range 0.5–2.5 μm. *Optics and Spectroscopy* 103(6): 943–946. <https://doi.org/10.1134/S0030400X0712017X>
23. Madelung O, Schulz M, Weiss H (1987) *Landolt-Börnstein (New Series, Group III, Vol. 41, Subvolume B)* Springer-Verlag.
24. School ar RB, Dixon JR (1965) Optical constants of lead sulfide in the fundamental absorption region. *Physical Review* 137(2A): A667–A670. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.137.A667>
25. Petrus RYU, et al. (2020) Optical properties of CdS thin films. *Journal of Applied Spectroscopy* 87(1): 35–40. <https://doi.org/10.1007/s10812-020-00959-7>
26. Ataeva SU, Mehdiyeva SI, Isaev AI (2015) Dispersion of the refractive index of a samarium-doped Se<sub>95</sub>Te<sub>5</sub> chalcogenide glassy semiconductor. *Semiconductors* 49(7): 949–952. <https://doi.org/10.1134/S1063782615070040>
27. Meshalkin AYU (2025) *Foto- i elektronno-stimulirovannye protsessy v tonkoplenochnykh strukturakh karbazol-soderzhashchikh polimerov i khal'kogenidnykh stekol* [Photo- and electron-stimulated processes in thin-film structures of carbazole-containing polymers and chalcogenide glasses]: diss. ... d-ra fiz. nauk. Kishinev.
28. Tepantlán CS, González AMP, Arreola IV (2008) Structural, optical and electrical properties of CdS thin films obtained by spray pyrolysis. *Revista Mexicana de Física* 54(2): 112–117.

Поступила 29.12.2025; после доработки 05.02.2026; принята к опубликованию 17.02.2026.2026  
Received December 29, 2025; received in revised form February 5, 2026; accepted February 17, 2026

#### Информация об авторах

##### **Бельх Юлия Алексеевна,**

магистрант 2 курса, инженер, УдГУ, Ижевск, Российская Федерация, e-mail: [belykh.yu.a@mail.ru](mailto:belykh.yu.a@mail.ru)

##### **Закирова Раушания Мазитовна,**

кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий инженер, УдГУ, Ижевск, Российская Федерация

##### **Федотова Ирина Витальевна,**

кандидат физико-математических наук, доцент, УдГУ, Ижевск, Российская Федерация

#### Information about the authors

##### **Yuliya A. Belykh,**

2nd year Master's Student, Engineer, Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: [belykh.yu.a@mail.ru](mailto:belykh.yu.a@mail.ru)

##### **Raushaniya M. Zakirova,**

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Senior Engineer, Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation

##### **Irina V. Fedotova,**

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation