

## СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТОВ CdS В ПОЛИМЕРНОЙ ОБОЛОЧКЕ

Помогайло Д.А.<sup>1\*</sup>, Спирин М.Г.<sup>2</sup>, Скобеева В.М.<sup>3\*\*</sup>,  
Джардималиева Г.И.<sup>2\*\*\*</sup>, Смынтына В.А.<sup>3\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

<sup>2</sup> Институт проблем химической физики РАН,

ИПХФ РАН, просп. академика Семенова, 1, Черноголовка, Московская область, 142432, Россия

<sup>3</sup> Научно-исследовательский институт физики Одесского национального университета им. И.И. Мечникова,  
ул. Пастера, 27, Одесса, 65082, Украина

\* e-mail: [dimanpot@bk.ru](mailto:dimanpot@bk.ru)

\*\* e-mail: [v\\_skobeeva@ukr.net](mailto:v_skobeeva@ukr.net)

\*\*\* e-mail: [dzhardim@icp.ac.ru](mailto:dzhardim@icp.ac.ru)

\*\*\*\* e-mail: [smyntyna@onu.edu.ua](mailto:smyntyna@onu.edu.ua)

Наноконпозиты с различной концентрацией наночастиц сульфидов в полиакриламидной оболочке получены в результате взаимодействия нитрата кадмия с акриламидом и сульфидующим агентом (тиомочевинной) в определенных стехиометрических соотношениях с последующей термической полимеризацией реакционной смеси. Образцы исследованы с использованием методов элементного анализа, рентгеновской дифракции, сканирующей электронной микроскопии, оптической и люминесцентной спектроскопии. Определены размеры наночастиц сульфидов и их распределение в полимере. Показано, что спектры поглощения имеют характерные черты спектров композитных систем с наноразмерными полупроводниковыми кристаллами, которые проявляют «дефектную» люминесценцию с максимумом в области 550–570 нм.

*Ключевые слова:* наноконпозиты, сульфид кадмия, полиакриламидная оболочка, фронтальная полимеризация металломономеров.

### Введение

Спутники и космические аппараты характеризуются наличием большого количества подвижных механических частей, надежность которых ограничена деградацией смазочных материалов вследствие чрезмерного износа, обусловленного воздействием атомарного кислорода, солнечной радиации, активных частиц и циклических изменений температуры. Трибологические покрытия типа «хамелеон» позволяют добиться длительного срока службы авиационных и космических систем за счет самопроизвольной адаптации химических свойств материала при изменении параметров окружающей среды. Однако проблемой существующих аэрокосмических покрытий такого типа является изменение химического состава трибологических слоев на поверхности в зависимости от состава и температуры окружающей среды в процессе трения.

В качестве перспективных веществ, способных снижать трение при эксплуатации многофункциональных наноструктурных покрытий типа «хамелеон» в реальных условиях, могут быть использованы халькогениды, введенные в состав покрытия. Так, халькогениды в вакууме или сухом азоте обладают способностью снижать коэффициент трения до значений менее 0,1; халькогениды, окруженные керамической матрицей, при высоких температурах порядка 500°C — до 0,2 [1]. Наиболее актуальны полимерные наноконпозиции с халькогенидами переходных металлов, обладающие целым комплексом оптических, электрофизических, фотохимических и магнитных свойств, что позволяет создавать на их основе люминесцентные экраны, преобразователи, сенсоры, светодиоды и другие материалы авиационно-космической техники [2–10].

При этом полимерная матрица обеспечивает высокие физико-механические характеристики на-

нокомпозиций (гибкость, обрабатываемость), а активные наполнители — высокую чувствительность и эффективные фотолюминесцентные свойства. Варьируя условия синтеза и состав, можно управлять структурой материала, его химическими, каталитическими и сенсорными свойствами [7–9]. Существуют два подхода к получению нанокомпозитов. Один из них заключается во введении предварительно синтезированных наночастиц в полимерную матрицу, второй — в получении *in situ*, т.е. в момент получения композита одновременно происходит формирование наночастиц в среде полимеризующейся матрицы, что способствует равномерному распределению наночастиц. В настоящем исследовании с использованием второго подхода были получены *in situ* нанокомпозиты различного состава на основе наночастиц сульфида кадмия в полимерной матрице; охарактеризованы их структура; установлена взаимосвязь между исходной концентрацией прекурсоров и размером образующихся наночастиц и исследованы их спектрально-люминесцентные свойства.

#### Экспериментальная часть

В работе использованы следующие реактивы:  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (х.ч.), акриламид (ААМ, Fluka), тиомочевина (ТМЧ, х.ч.), диметилсульфоксид (ДМСО, Sigma-Aldrich, 99,9%).

#### Получение нанокомпозитов сульфидов кадмия в полиакриламидной матрице методом термической полимеризации

Смеси нитрата кадмия, сульфидирующего агента и акриламида в различных количествах были спрес-

сованы на ручном прессе в виде цилиндрических заготовок и помещены в пробирки. Затем нижнюю часть заготовки нагревали в течение нескольких минут в бане из сплава Вуда при 180–190 °С. Вследствие термического инициирования происходит фронтальная полимеризация акриламида, сопровождаемая сильным разогревом смеси нитрата кадмия с тиомочевинной. В результате происходит разложение тиомочевины в расплавленном нитрате кадмия, последующая диссоциация которого ведет к образованию ионов кадмия, которые реагируют в образовавшемся расплаве с ионами серы (II). Таким образом, происходит образование наночастиц сульфида кадмия в полиакриламидной оболочке. Данные о составе исходных компонентов смесей шихты представлены в табл. 1.

Структура полученных материалов исследована методом РФА при комнатной температуре на дифрактометре DRON UM-2; морфология поверхности образцов нанокомпозитов изучена с помощью сканирующего электронного микроскопа FEI QUANTA 200 FEG.

Спектры поглощения образцов измеряли с помощью спектрофотометра «Shimadzu UV-3101PC», а спектры люминесценции регистрировали на спектрофлуориметре «Perkin Elmer LS55».

#### Результаты и их обсуждение

В результате реакции термической полимеризации акриламида в присутствии нитрата кадмия и тиомочевины (концентрации в табл. 1) при 180 °С получены нанокомпозиты различного состава (табл. 2).

Таблица 1

Состав исходных смесей шихты

Наименование образца	Весовое соотношение, г			Мольное соотношение $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ : ТМЧ:ААМ
	$\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	ААМ	ТМЧ	
1CdSpAAM	0,52	4,75	0,129	1:1:40
2CdSpAAM	1,04	4,5	0,5	1:1:20
3CdSpAAM	1,54	4,25	0,38	1:1:11
4CdSpAAM	2,5	2,55	0,675	1:1:4

Таблица 2

Элементный анализ полученных нанокомпозитов

Наименование образца	Найдено, в %				Содержание сульфида металла, %
	С	Н	S	Сухой остаток	
1CdS-pAAM	46,52	6,81	0,69	4,71	3,10
2CdS-pAAM	40,04	6,47	2,23	8,35	9,38
3CdS-pAAM	40,48	5,88	3,5	11,59	13,03
4CdS-PAAM	30,07	6,00	4,5	21,71	24,41

Сравнительный анализ данных, приведенных в табл. 2, и данных о составе исходных компонентов смеси (табл. 1) указывает на возможность целенаправленного получения композитов с большим содержанием сульфида кадмия (табл. 2).

Электронно-микроскопическое изображение нанокomпозиций, содержащих разные концентрации нанокристаллов сульфида кадмия, не позволяет идентифицировать сами наночастицы из-за недостаточного разрешения микроскопа. Однако видно заметное влияние их концентрации на морфологию

$$D = 0,89\lambda / (l \cos \theta), \tag{1}$$

где  $\lambda$  — длина волны рентгеновского излучения,  $\lambda$  (CuK $\alpha$ ) = 1,54051 Å;  $l$  — ширина пика на половине высоты (рад);  $\theta$  — угол дифракции (рад).

Согласно данным, полученным по уравнению Дебая—Шеррера, размер частиц изменяется в узком интервале значений 4—15 нм с возрастанием доли CdS в композите (табл. 3). Увеличение концентрации CdS снижает размер частиц кристаллитов CdS.

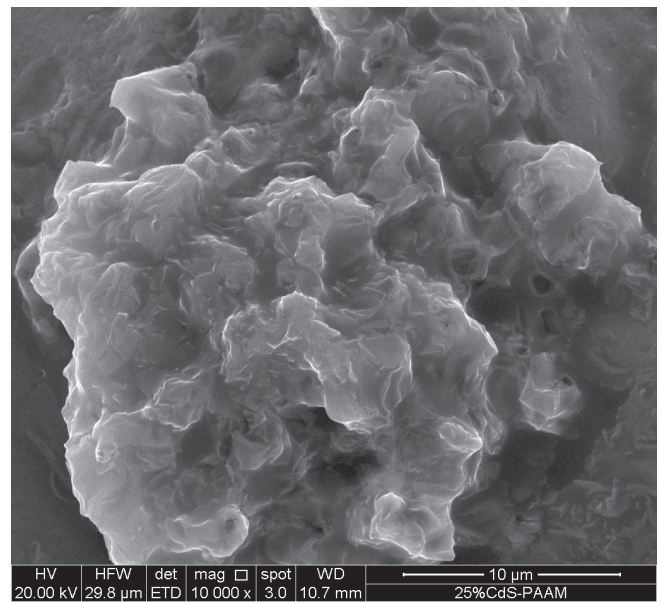
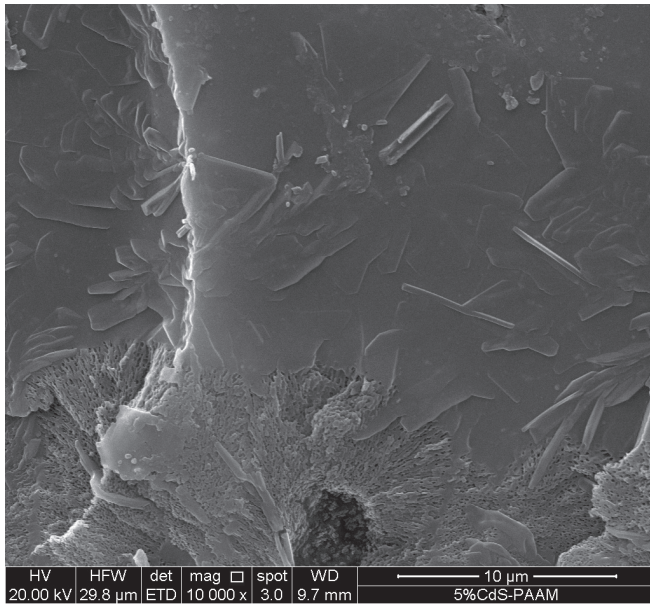


Рис. 1. Электронно-микроскопические снимки нанокomпозитов: а — 1CdS-pAAM; б — 4CdS-pAAM

поверхности, а именно увеличение концентрации сульфида кадмия приводит к повышению компактности и структурированности композита (рис. 1).

РФА-анализ полученных нанокomпозитов (рис. 2) выявил следующие рефлексы при  $2\Theta$ : 26,35; 43,85; 51,85 со значениями  $d = 3,357$ ; 2,085; 1,756, характерные для гексагонального сульфида кадмия со структурой вюрцита. Интенсивная широкая полоса в области  $2\Theta = 21^\circ$  принадлежит полиакриламиду. Характерно, что интенсивность пиков CdS-содержащей фазы уменьшается по мере увеличения концентрации сульфида кадмия в композите с одновременным увеличением межплоскостных расстояний, что свидетельствует о связывании нанокристаллов с полимерной матрицей. Средние размеры кристаллитов (наночастиц)  $D$ , соответствующие размерам областей когерентного рассеяния рентгеновских лучей, были оценены по ширине рефлексов на рентгенограммах согласно формуле Дебая—Шеррера:

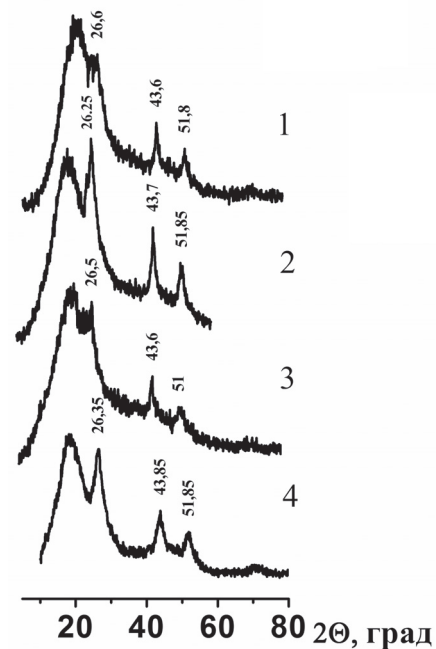


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы нанокomпозитов: 1 — 1CdSpAAM; 2 — 2CdSpAAM; 3 — 3CdSpAAM; 4 — 4CdSpAAM

Таблица 3

Размеры кристаллитов CdS,  
рассчитанные по данным РФА

Наименование образца	Размер частиц, нм	
	РФА	Спектры поглощения
1CdS-рААМ	11,7	8,4
2CdS-рААМ	7,2	7,0
3CdS-рААМ	15,0	5,4
4CdS-рААМ	4,2	4,6

Исследования с использованием оптических и люминесцентных методов, наиболее информативных и бесконтактных методов характеристики свойств наноразмерных объектов, показывают, что в случае нанокристаллов энергетический спектр носителей заряда является дискретным. Уровни энергии электронов и дырок в зонах проводимости и валентной равны [11–13]

$$E_{e,h}^{l,n} = \frac{\hbar^2 \phi_{l,n}^2}{2m_{e,h} R^2}, \quad (2)$$

где  $l, n$  — орбитальное и главное квантовые числа;  $\phi_{l,n}$  — корни функции Бесселя;  $R$  — средний радиус нанокристалла;  $\hbar$  — постоянная Планка;  $m_e$  — эффективная масса электрона.

Пороговые энергии межзонного поглощения, имеющие смысл «эффективной» ширины запрещенной зоны в КТ, описываются выражениями:

$$h\nu_{01} = E_g + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2\mu R^2}; \quad (3)$$

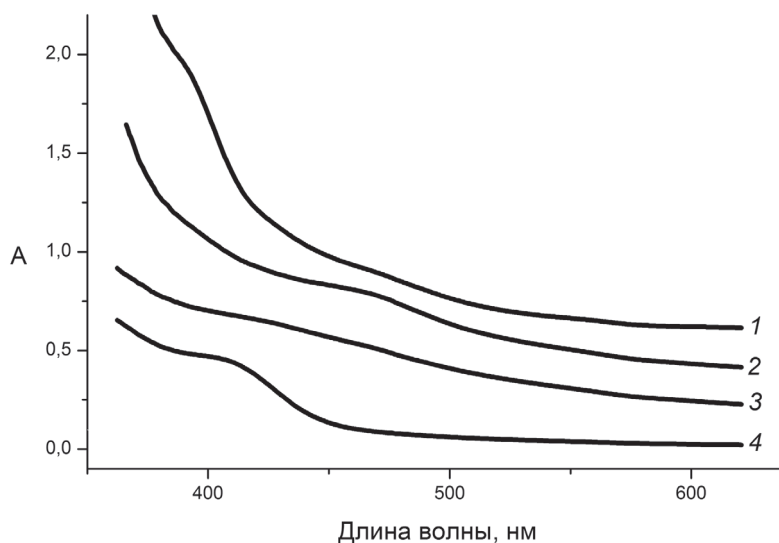


Рис. 3. Спектры поглощения образцов в ДМСО: 1 — 1CdS-рААМ; 2 — 2CdS-рААМ; 3 — 3CdS-рААМ; 4 — 4CdS-рААМ

$$\mu = \frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_h}, \quad (4)$$

где  $E_g$  — ширина запрещенной зоны макрокристалла;  $\mu$  — приведенная масса;  $m_e, m_h$  — эффективная масса электрона и дырки соответственно.

В случае частиц одного размера спектр поглощения состоял бы из набора линий, соответствующих переходам между уровнями электронов и дырок с соответствующими квантовыми числами  $l$  и  $n$ . Коэффициент поглощения в каждой линии пропорционален произведению приведенной плотности состояний уровней, которые участвуют в переходах в отдельном кристалле, на общее число наночастиц. В реальном случае всегда имеется распределение частиц по размерам и спектр поглощения представляет собой кривую, состоящую из перекрывающихся полос.

На основании приведенных теоретических представлений видно, что спектры оптического поглощения исследованных образцов (рис. 3) имеют характерные черты спектров композитных систем с наноразмерными полупроводниковыми кристаллами.

Кривая 1 на рис. 3, принадлежащая 1CdS-рААМ с минимальным количеством сульфида кадмия, имеет слабовыраженную полосу в области 470 нм, соответствующую первому оптическому переходу. С увеличением содержания CdS эта полоса сдвигается в коротковолновую сторону и локализуется в области длин волн 460, 435 и 420 нм (кривые 2, 3 и 4). В соответствии с этими значениями и на основании расчетов среднего радиуса нанокристаллов размеры (диаметры) полученных образцов 1, 2, 3, 4 соответственно равны 8,4; 7,0; 5,4; 4,6 (см.

табл. 3). Обращает на себя внимание монотонное уменьшение размеров нанокристаллов с увеличением их концентрации в композите, что совпадает качественно с данными РФА.

На рис. 4 приведены спектры люминесценции исследуемых композитов при возбуждении их светом с длиной волны 460 нм в ДМСО. Отметим, что сам полиакриламид, а также полиакриламидный комплекс кадмия не люминесцировал в данных условиях. Для всех образцов характерна широкая полоса свечения с максимумом в области 550—570 нм, соответствующая наночастицам CdS [14]. Очевидно, что эта полоса является сложной и представляет собой суперпозицию элементарных полос, причем ее интенсивность для образца 4CdS-рААМ (кривая 4) уменьшается по сравнению с люминес-

ценцией образцов 1CdS-рААМ, 2CdS-рААМ и 3CdS-рААМ. Обнаружено, что использование для возбуждения люминесценции света в диапазоне длин волн от 300 до 460 нм не приводит к существенным изменениям в положении максимума полосы или в ее интенсивности. Поэтому наблюдаемое уменьшение амплитуды пика с понижением размера частиц вероятнее всего связано с тем, что увеличивается отношение поверхности к объему частицы и возрастает число безызлучательных центров рекомбинации.

Подтверждением того, что данная люминесценция относится именно к сульфиду кадмия, служат спектры возбуждения образца 2CdS-рААМ (кривая 1) и 3CdS-рААМ (кривая 2), представленные на рис. 5 и наблюдаемые на длине волны 550 нм (в

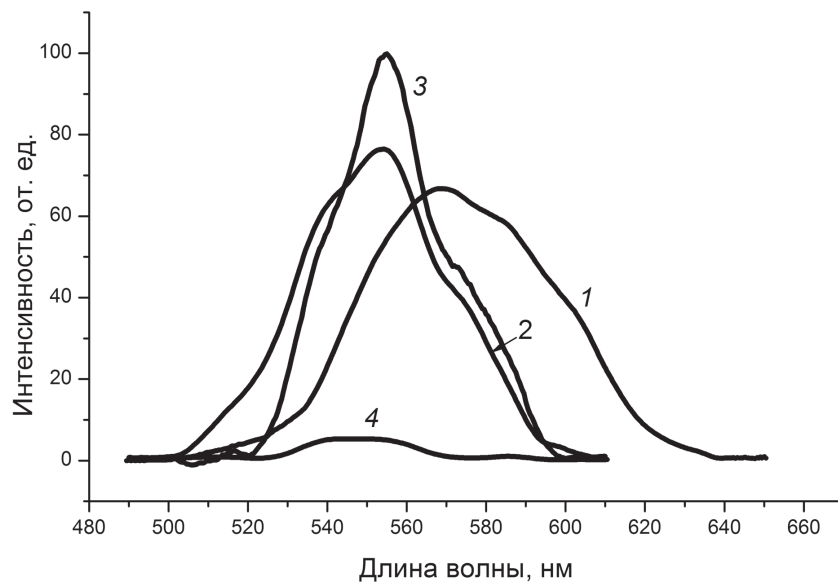


Рис. 4. Спектры люминесценции образцов в ДМСО: 1 — 1CdS-рААМ; 2 — 2CdS-рААМ; 3 — 3CdS-рААМ; 4 — 4CdS-рААМ. Длина волны возбуждения 460 нм

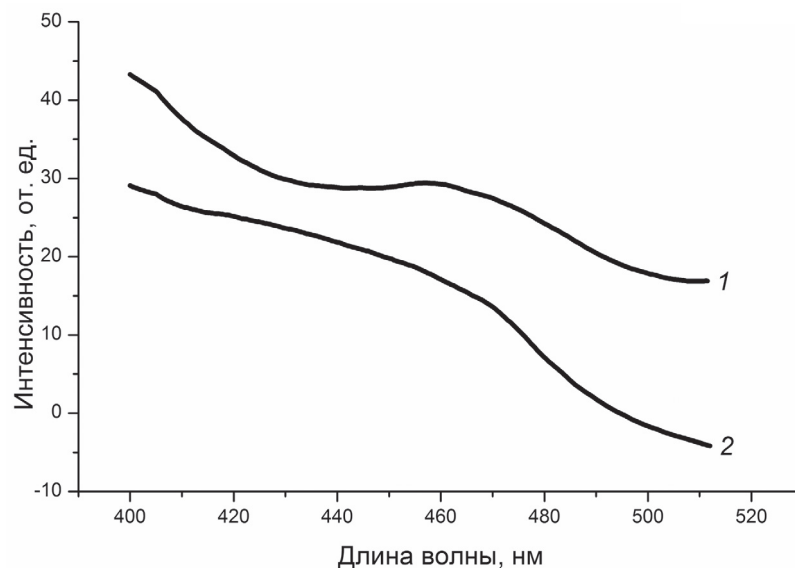


Рис. 5. Спектры возбуждения образцов: 1 — 2 CdS-рААМ; 2 — 3 CdS-рААМ в DMSO на длине волны 550 нм

максимуме полосы свечения). Видно, что эти кри-вые качественно воспроизводят спектры поглощения, соответствующие данным образцам.

Принимая во внимание, что в нашем случае стоксов сдвиг составляет около ста нанометров, а сами полосы люминесценции достаточно широкие (>50 нм), можно утверждать, что механизм люми-несценции осуществляется с участием дефектов [15]. Такими дефектами могут служить, например, ненасыщенные атомы серы или межузельные ионы кадмия. В работах [16, 17] рассматривался вопрос о природе центров люминесценции в нанокристал-лах сульфида кадмия в различных полимерных мат-рицах. По мнению авторов, природа люминесцен-ции в зеленой области спектра связана с наличием междуузельных ионов кадмия и не зависит от при-роды самой матрицы.

### Выводы

Исследованы наноконпозиты, содержащие по-лупроводниковые нанокристаллы CdS, полученные методом фронтальной полимеризации в полимере. Определены условия, обеспечивающие формиро-вание нанокристаллов сульфида кадмия в полиакри-ламидной матрице.

По данным электронной микроскопии обнару-жено структурирование композитов по мере увели-чения концентрации сульфида кадмия. Средний размер нанокристаллов изменялся в интервале 4,6—8,4 нм и уменьшался с увеличением их concentra-ции в композите, что качественно согласовывалось с данными РФА.

Коротковолновый сдвиг полосы оптического поглощения свидетельствует о влиянии размерно-го квантования на энергетическую структуру нано-кристаллов. Люминесценция образцов представляла собой излучательные переходы с участием дефек-тов нанокристаллов. На интенсивность люминес-ценции существенно влияют безызлучательные процессы с участием поверхностных дефектов на границе нанокристалл-матрица.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты: №14-0300542, РФФИ инд\_a, №13-03-92693) и программы №24 Президиума РАН.*

*Авторы выражают глубокую благодарность Dr. Mauro Zarrelli (Institute of Composite and Biomedical Materials, Portici, NA, Italy) за проведение электронно-микроскопического анализа образцов.*

### Библиографический список

1. *Кочанов Д.И.* Наноматериалы и нанотехнологии для машиностроения: состояние и перспективы приме-нения // РИТМ. 2010. № 8 (56). С. 16-21.
2. *Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд У.Е.* Наноча-стицы металлов в полимерах. — М.: Химия, 2000. — 671 с.
3. *Маггерамов А.М., Рамазанов М.А., Гаджиева Ф.В.* Структура и фотолюминесценция наноконпозитов сульфида кадмия с полипропиленом // Физика и химия обработки материалов. 2008. №1. С. 71-74.
4. *Губин С.П., Катаев Н.А., Хомутов Г.Б.* Перспектив-ные направления наноауки: химия наночастиц полупроводниковых материалов // Известия Акаде-мии наук. Сер. химическая. 2005. №4. С. 811-836.
5. *Semiconductor nanocrystal quantum dots: synthesis, assembly, spectroscopy and applications* // Ed. A.L. Rogach. New York, Springer-Verlag Wien. 2008. — 372 p.
6. *Николенко Л.М., Разумов В.Ф.* Коллоидные кванто-вые точки в солнечных элементах // Успехи химии. 2013. Т. 82. №5. С. 429-448.
7. *Бирюков А.А., Готовцева Е.Ю., Изаак Т.И., Светлич-ный В.А.* Исследование кинетики фотополимериза-ции метилметакрилата, инициируемой квантовы-ми точками сульфида кадмия // Вестник Томского государственного университета. 2013. №375. С. 194-199.
8. *Боченков В.Е., Сергеев Г.Б.* Наноматериалы для сен-соров // Успехи химии. 2007. № 76 (11). С. 1084.
9. *Помогайло Д.А., Singh S., Singh M., Yadav B.С., Tandon P., Помогайло С.И., Джардималиева Г.И., Кыдралие-ва К.А.* Наноконпозитные полимер-опосредованные сенсорные материалы // Неорганические матери-алы. 2014. Т.50. №3. С. 320-330.
10. *Fang Yuan, Li Chen, Cai-Feng Wang, Su Chen.* Facile synthesis of fluorescent quantum dot-polymer nanocomposites via frontal polymerization // Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry. Volume 48, Issue 10, 8 APR 2010. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pola.23986/pdf>
11. *Ekimov A.I., Efros A.L., Onushchenko A.A.* Quantum size effect in semiconductor microcrystals // Solid State Communication. 1985. V.56. N.11. P. 921-924.
12. *Кулиш Н.Р., Кунец В.П., Лисица М.П., Малыш Н.И.* Эволюция спектров поглощения при переходе от объемных к квантово-размерным кристаллам CdS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> // Украинский физический журнал. 1992. Т.37. №8. С.1141-1146.
13. *Кулиш Н.Р., Кунец В.П., Лисица М.П.* Определение параметров полупроводниковых квантовых точек в стеклянных матрицах из спектров поглощения, люминесценции и насыщения оптического погло-щения // Физика твердого тела. 1997. Т. 39. № 10. С. 1865 -1870.
14. *Pucci A., Boccia M., Galembeck F., Paula Leite C.A., Tirelli N., Ruggeri G.* Luminescent nanocomposites containing CdS nanoparticles dispersed into vinyl

- alcohol based polymers // *Reactive&Functional Polymers*. 2008. V.68. P. 1144-1151.
15. Chandrasekharan N., Kamat P.V. Tuning the properties of CdSe nanoparticles in reverse micelles // *Research on Chemical Intermediates*. 2002. V.28. N.7-9. P. 847-856.
  16. Smyntyna V., Skobeeva V., Malushin N. The nature of emission centers in CdS nanocrystals // *Journal of Radiation Measurements*. 2007. V.42. P. 693-696.
  17. Smyntyna V.A., Skobeeva V.M., Malushin N.V., Pomogailo A.D. Influence of matrix on photo luminescence of CdS nanocrystals // *Photoelectronics. Inter-universities scientific articles*. 2006. No.15. P. 38-42.

## SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES OF CdS NANOCOMPOSITES IN A POLYMER SHELL

**Pomogailo D.A.<sup>1\*</sup>, Spirin M.G.<sup>2</sup>, Skobeeva V.M.<sup>3\*\*</sup>,  
Dzhardimalieva G.I.<sup>2\*\*\*</sup>, Smyntyna V.A.<sup>3\*\*\*\*</sup>**

<sup>1</sup> *Moscow Aviation Institute (National Research University),*

*MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences,*

*IPCP RAS, 1, Academician Semenov av., Chernogolovka, Moscow region, 142432, Russia*

<sup>3</sup> *Scientific Research Institute of Physics of Odessa National University named after I.I. Mechnikov,*  
*27, Pastera str., Odessa, 65082, Ukraine*

\* e-mail: dimanpom@bk.ru

\*\* e-mail: v\_skobeeva@ukr.net

\*\*\* e-mail: dzhardim@icp.ac.ru

\*\*\*\* e-mail: smyntyna@onu.edu.ua

### Abstract

Nanocomposites of different concentration of cadmium sulfides nanoparticles in polyacrylamide shell were obtained as a result of interaction of cadmium nitrate with acrylamide and sulphonating agent (thiourea) in certain stoichiometric ratios and subsequent thermal polymerization of the reaction mixture. The samples were studied using methods of elemental analysis, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, optical and fluorescent spectroscopy. The size and distribution of sulfide nanoparticles in polymer were defined. X-ray diffraction analysis of nanocomposites obtained revealed the following reflections at  $2\Theta$ : 26.35; 43.85; 51.85 with the values of  $d$  equal to 3.357; 2.085; 1.756, characteristic for hexagonal cadmium sulfide with wurtzite structure. Intense broadband at  $2\Theta = 21$  belongs to polyacrylamide. It is characteristic that the intensity of CdS-containing phase peaks decreases with the increase of cadmium sulfide concentration in the composite with a simultaneous increase in the interplanar spacing. It proves nanocrystals binding with a polymer matrix. The average crystallite size (nanoparticles), corresponding to the sizes of coherent scattering of X-rays ranges, were evaluated at the width of the reflections in the diffraction

patterns according to Debye-Scherrer formula. Particles size varies within a narrow range of values and ranges from 4 to 15 nm with increasing of the CdS share in the composite. Increasing of the CdS concentration reduces the particles size of the CdS crystallites.

Submicroscopic image of nanocomposites containing different concentrations of cadmium sulfide nanocrystals indicates a noticeable effect of nanoparticles concentration on the surface morphology. That is, increase in the cadmium sulphide concentration leads to an increase in the compactness and structuredness of the composite.

It was shown that the absorption spectra has characteristic features of the spectra of composite systems with nanosized semiconductor crystals, which show "defective" luminescence with maximum in the range of 550-570 nm.

**Keywords:** nanocomposites, cadmium sulfide, polyacrylamide shell, frontal polymerization of metal-monomers.

### References

1. Kochanov D.I. *RITM*, 2010, vol. 56, no. 8, pp. 16-21.
2. Pomogailo A.D., Rozenberg A.S., Uflyand U.E. *Nanochastitsy metallov v polimerakh* (Metals'

- nanoparticles in polymers), Moscow, Khimiya, 2000, 671 p.
3. Maggeramov A.M., Ramazanov M.A., Gadzhieva F.V. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2008, no. 1, pp. 71-74.
  4. Gubin S.P., Kataev N.A., Khomutov G. B. *Izvestiya Akademii Nauk. Seriya khimicheskaya*, 2005, no. 4, pp. 811-836.
  5. Rogach A.L. *Semiconductor nanocrystal quantum dots: synthesis, assembly, spectroscopy and applications*, New York, Springer-Verlag, Wien, 2008, 372 p.
  6. Nikolenko L.M., Razumov V.F. *Uspekhi khimii*, 2013, vol. 82, no. 5, pp. 429-448.
  7. Biryukov A.A., Gotovtseva E.Yu., Izaak T.I., Svetlichnyi V.A. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 375, pp. 194-199.
  8. Bochenkov V.E., Sergeev G.B. *Uspekhi khimii*, 2007, no. 76 (11), p. 1084.
  9. Pomogailo D.A., Singh S., Singh M., Yadav B.C., Tandon P., Pomogailo S.I., Dzhardimalieva G.I., Kydralieva K.A. *Neorganicheskie materialy*, 2014, vol. 50, no. 3, pp. 320-330.
  10. Fang Yuan, Li Chen, Cai-Feng Wang, Su Chen. Facile synthesis of fluorescent quantum dot-polymer nanocomposites via frontal polymerization. *Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry*. 2010, vol. 48, issue 10, available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pola.23986/pdf>
  11. Ekimov A.I., Efros A.L., Onushchenko A.A. Quantum size effect in semiconductor microcrystals. *Solid State Communication*, 1985, vol. 56, no. 11, pp. 921-924.
  12. Kulish N.R., Kunets V.P., Lisitsa M.P., Malysh N.I. *Ukrainskii fizicheskii zhurnal*, 1992, vol. 37, no. 8, pp. 1141-1146.
  13. Kulish N.R., Kunets V.P., Lisitsa M.P. *Fizika tverdogo tela*, 1997, vol. 39, no.10, pp. 1865 -1870.
  14. Pucci A., Boccia M., Galembeck F., Paula Leite C.A., Tirelli N., Ruggeri G. Luminescent nanocomposites containing CdS nanoparticles dispersed into vinyl alcohol based polymers. *Reactive&Functional Polymers*, 2008, vol. 68, pp. 1144-1151.
  15. Chandrasekharan N., Kamat P.V. Tuning the properties of CdSe nanoparticles in reverse micelles. *Research on Chemical Intermediates*, 2002, vol. 28, no. 7-9, pp. 847-856.
  16. Smyntyna V., Skobeleva V., Malushin N. The nature of emission centers in CdS nanocrystals. *Journal of Radiation Measurements*, 2007, vol. 42, pp. 693-696.
  17. Smyntyna V.A., Skobeleva V.M., Malushin N.V., Pomogailo A.D. Influence of matrix on photo luminescence of CdS nanocrystals. *Photoelectronics. Inter-universities scientific articles*, 2006, no. 15, pp. 38-42.