

УДК 538.9,535.5

PACS: 81.07.-b

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-107-114

EDN: VTAQFY

**Спектральные характеристики мелкодисперсных кристаллов ZnAg, осаждённых из водного раствора на подложку в электрическом поле***В. И. Тютюнников*

Исследовались спектры ультрадисперсных частиц ZnS-Ag, осаждённых на подложку в электрическом поле. Для получения мелкодисперсных частиц использовали промышленный люминофор К-75 (ZnS-Ag). Спектры люминесценции получали при воздействии на образец ультрафиолетовым светом ($\lambda = 365$ нм). Анализ спектров показал, что спектральные характеристики отличаются для образцов с различной размерностью кристаллов. Так для промышленного образца спектр люминесценции имел полосу с $\lambda_{max} = 453$ нм и с полушириной $\Delta\lambda = 58,5$ нм. Для ультрадисперсных кристаллов ZnS-Ag, осаждённых обычным способом, спектральная полоса имела $\lambda_{max} = 452,4$ нм с полушириной $\Delta\lambda = 58,0$ нм. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) для образцов, полученных путём осаждения ультрадисперсных кристаллов ZnS-Ag в электрическом поле на подложку, имеют параметры с $\lambda_{max} = 451,5$ нм и с полушириной $\Delta\lambda = 57,6$ нм. При измерении ширины запрещённой зоны образцов была установлена зависимость ширины запрещённой зоны от размеров кристаллов полупроводника. Наиболее заметный эффект был получен при осаждении на подложку наноразмерных кристаллов в электрическом поле. Так для промышленного образца ширина запрещённой зоны составила 4,06 эВ, а для мелкодисперсных образцов, осаждённых обычным способом и в электрическом поле – 4,09 и 4,10 эВ соответственно. Полученные результаты показывают, что ширина запрещённой зоны увеличивается при уменьшении размеров кристаллов до наноразмерных величин. Поляризация света при прохождении светового луча через образцы тоже показала различные результаты. Так, луч света при прохождении образца из исходного материала имел степень поляризации $P = 0,094$. Для образца, полученного путём осаждения мелкодисперсных частиц обычным способом, степень поляризации прошедшего луча составила $P = 0,110$. И для образца, приготовленного из мелкодисперсных частиц ZnS-Ag, осаждённых в электрическом поле, степень поляризации прошедшего светового луча оказалась $P = 0,117$. Полученные результаты показывают, что материалы, полученные из мелкодисперсных частиц, путём осаждения их в электрическом поле, имеют различия по физическим параметрам.

Ключевые слова: спектр, ультрадисперсные кристаллы, фотолюминесценция, электрическое поле.

Введение

Интерес к полупроводниковым материалам группы A^2B^6 значительно возрос в связи с

их уникальными оптическими и люминесцентными свойствами, которые могут быть использованы в различных оптоэлектронных устройствах. Они используются в инфракрас-

Тютюнников Владимир Иванович, к.ф.-м.н., доцент.
E-mail: vladimir-tjutjunnikov@rambler.ru
Приазовский государственный технический университет.
Россия, 287500, г. Мариуполь, ул. Университетская 7.

Статья поступила в редакцию 10.03.2023
После доработки 7.06.2023
Принята к публикации 15.06.2023

© Тютюнников В. И., 2023

ных датчиках и детекторах, лазерах, люминофорах, солнечных элементах, светодиодах, фотохимических ячейках, катализаторах, переключателях сопротивления и энергонезависимых устройствах памяти. Поэтому соединения на основе материалов группы A^2B^6 проходят самые различные исследования и испытания. Так авторы [1] определили влияние паров воды при окислении нелегированных пленок ZnS на структурно-люминесцентные свойства полученных пленок. Сотрудники [2–4] исследовали оптические, электрические и структурные свойства наноматериалов ZnS, легированных Mn^{2+} , которые считаются важными люминесцентными материалами из-за их способности модифицировать энергетическую зону и генерировать люминесцентные центры с различными уровнями энергии, что приводит к различным интересным свойствам и применениям. Исследователи [5] изучали влияние условий химического осаждения порошков наноструктурированного сульфида цинка и гетеронаноструктур ZnS/Ag₂S на размер и фазовый состав сульфидных наночастиц, на их оптические свойства (спектры диффузного отражения, ширину запрещенной зоны и люминесценцию). Авторы работы [6] синтезировали наночастицы ZnS химическим путем с использованием микроволнового излучения. Перспективными соединениями, которые могут быть использованы для создания селективных сорбционных материалов, являются сульфиды металлов. Сульфиды CdS, CuS, NiS успешно использовали для извлечения серебра из водных растворов [7]. Поскольку ZnS может иметь как кубическую, так и гексагональную структуру с широкой запрещенной зоной 3,54 и 3,91 эВ соответственно, среди полупроводников группы A^2B^6 он становится наиболее интересным объектом для модификации своих свойств [8–11]. Увеличение ширины запрещенной зоны наноструктурированных сульфидов и гетеронаноструктур наблюдается при уменьшении размеров наночастиц и при создании сульфидных нанокомпозитов двух разных металлов [12, 13]. Помимо низкой стоимости, доступности прекурсоров, простоты приготовления и химической стабильности, кристаллы ZnS обладают высоким коэффициентом поглощения в види-

мой области оптического спектра и улучшенными электрическими свойствами [14]. Цель данной работы заключается в исследовании оптических и электрических свойств мелкодисперсных кристаллов ZnS-Ag, осажденных на подложку в электрическом поле.

Материал и методики

Спектральные характеристики исследовались на высоковакуумной установке, технические параметры которой представлены в работе [13]. Получение спектров производилось с помощью монохроматора ЗМР-3 (обратная дисперсия в синей области спектра 0,5 нм/мм). В качестве регистрирующего устройства использовали фотоэлектронный усилитель (ФЭУ 84-3). Сигнал с ФЭУ усиливался усилителем У-5-11 и записывался на диаграммную ленту самописца (КСП-4). Для возбуждения ФЛ применялась ртутная лампа ДРШ-250 (область пропускания света $h\nu = 3,35\text{--}5,00$ эВ). Полоса УФ-света с $\lambda_{\max} = 365$ нм выделялась светофильтром УФС-2. Запись спектров производилась при комнатной температуре. Микрофотографии образцов были получены на сканирующем электронном микроскопе – JSM-6390LV. Коэффициент пропускания измеряли на спектрофотометре СФ-46, затем полученные данные использовали для определения ширины запрещенной зоны. Методика определения ширины запрещенной зоны полупроводников представлена в работах [15, 16]. Мелкодисперсные кристаллы ZnS-Ag получали путём разделения на фракции в коллоидном водном растворе промышленного люминофора К-75. Коллоидный раствор выдерживался в пробирке несколько дней до полной прозрачности воды. После этого для исследований использовали раствор из верхней части пробирки. Эмульсия наносилась на подложку из нержавеющей стали, или пластинки из кварцевого стекла, в виде эмульсии ZnS-Ag водного раствора, затем вода удалялась путём выпаривания. Температура подложки, при удалении воды, поддерживалась в пределах 60–65 °С. Такой режим испарения даёт возможность эффективнее удалить воду из образца и, в тоже время, не способствует образованию конвективных потоков, которые не позволяют зафиксировать частицы в опреде-

лённом положении. Процесс нанесения эмульсии проводился несколько раз до образования на поверхности подложки матового налёта. Исследовались образцы ZnS-Ag, нанесенные на подложку, как при обычных условиях, так и в электрическом поле. При осаждении частиц на подложку в электрическом поле напряжённость электрического поля составляла 10^5 В/м. Для получения вольтамперных характеристик использовали приборы: блок питания постоянного тока Б5-47, комбинированные приборы: В7-35 и Ц4300.

Результаты и их обсуждение

В данной работе была использована фотолюминесценция, которая является весьма информативной и широко применяется при изучении ультрадисперсных систем. На рис. 1 представлены спектры ФЛ образцов промышленного люминофора К-75 (линия 1, а) и образцов полученных при осаждении частиц ультрадисперсных кристаллов (УДК) при обычных условиях (линия 1, б) и при осаждении в электрическом поле (линия 1, в).

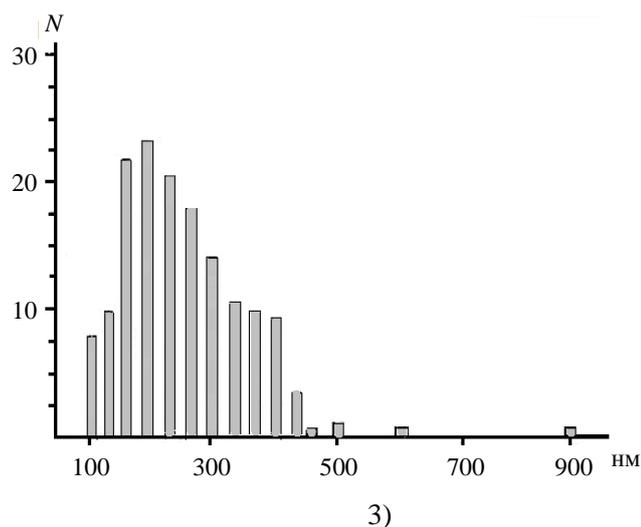
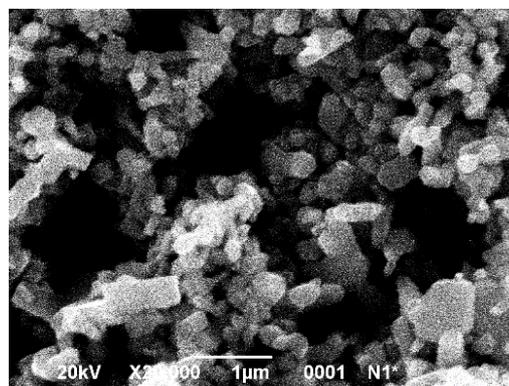
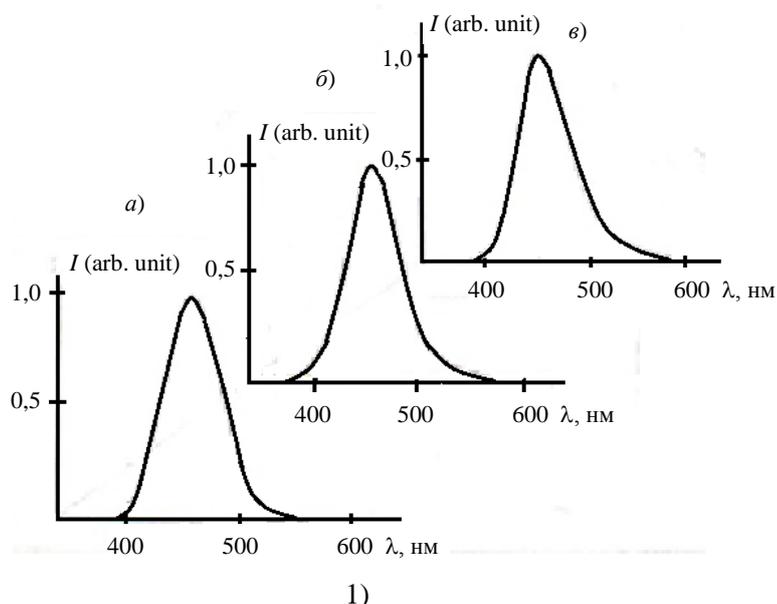


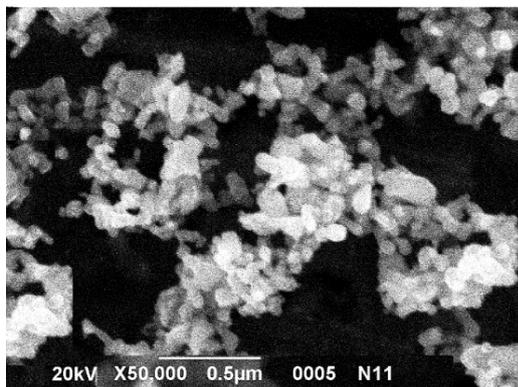
Рис. 1. Спектры ФЛ для образцов ZnS-Ag и микрофотография промышленного образца: 1) а – промышленный люминофор (К-75) ZnS-Ag, 1) б – микрочастицы ZnS-Ag, осаждённые при обычных условиях, 1) в – микрочастицы ZnS-Ag, осаждённые в электрическом поле; 2) микрофотография промышленного образца (К-75) ZnS-Ag; 3) гистограмма частиц промышленного образца (К-75) ZnS-Ag

Полученный в данной работе спектр ФЛ (рис. 1-1.а) промышленного люминофора ZnS-Ag (К-75) представлен полосой с длиной волны в максимуме: ($\lambda_{\text{max}} = 453$ нм) и с полушириной $\Delta\lambda = 58,5$ нм и охватывающей диапазон от 400 до 550 нм. Анализ микрофото-

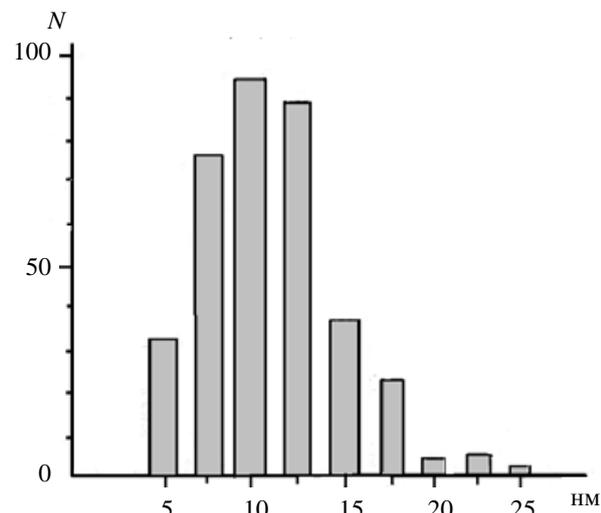
графии промышленного люминофора (рис. 1-2) и построенная гистограмма (рис. 1.3) показывают, что размеры кристаллов находятся в пределах 100–400 нм. Спектр ФЛ для образца, полученного путём осаждения мелкодисперсных кристаллов ZnS-Ag при обычных условиях

на подложку представлен линией (рис. 1-1.б) с $\lambda_{\max} = 452,4$ нм и с полушириной $\Delta\lambda = 58,0$ нм и охватывающей диапазон от 380 до 570 нм. Спектры ФЛ для образцов, полученных путём осаждения УДК ZnS–Ag в электрическом поле (рис. 1-1.в) на подложку имеют параметры с $\lambda_{\max} = 451,5$ нм и с полушириной $\Delta\lambda = 57,6$ нм и имеют диапазон от 390 до 570 нм. Анализ спектров (рис.1-1) показывает не значительное различие между спектрами ФЛ для исходного образца, нанесённого на подложку обычным способом и спектрами УДК, нанесённых на подложку в электрическом поле. Видно, что исходный образец имеет спектр присущий кристаллической структуре сфалерит. В большинстве работ отмечается, что ZnS–Ag со структурой сфалерит имеет спектр с $\lambda_{\max} =$

$= 450–460$ нм. Наблюдается уменьшение полуширины спектральных полос для мелкодисперсных кристаллов (рис. 1-1) полосы б и в). Этому, видимо, способствует направленная определённым образом ориентация кристаллов в магнитном или электрическом поле. ZnS является диамагнетиком, что способствует его поляризации в магнитном поле. При попадании УДК ZnS–Ag в сильное электрическое поле (10^5 В/м) частицы приобретают электрический дипольный момент, что также способствует их определённой ориентации. Уровень поляризации ультрадисперсных кристаллов в электрическом поле (направление оптической оси кристалла) выше, чем кристаллов промышленного образца.



а)



б)

Рис. 2. а) – микрофотография ультрадисперсной фракции промышленного образца; б) – гистограмма ультрадисперсных частиц (К-75) ZnS–Ag

На поляризацию наночастиц в электрическом поле указывается и в работах [13, 17–19]. Анализ гистограммы УДК показывает, что размеры УДК находятся в пределах 5–18 нм (рис. 2б). Глубина воздействия ультрафиолетового излучения на кристаллические материалы до нескольких микрон. Схожие параметры спектров указывают на то, что кристаллическое окружение активатора (иона Ag) в приповерхностном слое остаётся неизменным при измельчении кристаллов ZnS–Ag. Анализ полученных результатов показывает, что ширина запрещённой зоны ZnS–Ag заметно увеличивается при осаждении УДК ZnS–Ag в

электрическом поле. При этом, уменьшение размеров кристалла до наноразмерных величин позволяет воздействовать на спектральные характеристики материала. Для того чтобы определить ширину запрещённой зоны промышленного образца и УДК ZnS–Ag, на спектрофотометре СФ-46 были определены коэффициенты пропускания в видимой области длин волн. Затем по известной методике определили коэффициенты поглощения и построили графики в координатах $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ [16, 17] рис. 3а). Значение ширины запрещённой зоны (E_g) получили путём линейной интерполяции прямолинейного участка графика

на ось абсцисс. Ширина запрещённой зоны промышленного образца К-75 оказалась равной 4,06 эВ (линия 3), для УДК (при осаждении в обычных условиях) 4,09 эВ (линия 2) и для УДК (при осаждении в электрическом поле, напряжённостью 10^5 В/м) 4,10 эВ (линия 1). Эти результаты можно объяснить разной размерностью кристаллов, что подтверждается гистограммами образцов: рис. 1.3) и рис. 2б). Данные значения ширины запрещённой зоны

получены при комнатной температуре. В данной работе наблюдается зависимость значения ширины запрещённой зоны E_g от размеров кристаллов и способа осаждения. В литературе [20, 21] указывается, что уменьшение размеров нанокристаллов приводит и к изменению их спектров свечения. Влияние размеров наночастиц на их спектральные характеристики наиболее ярко проявляется при размерах наночастиц в области до 10 нм.

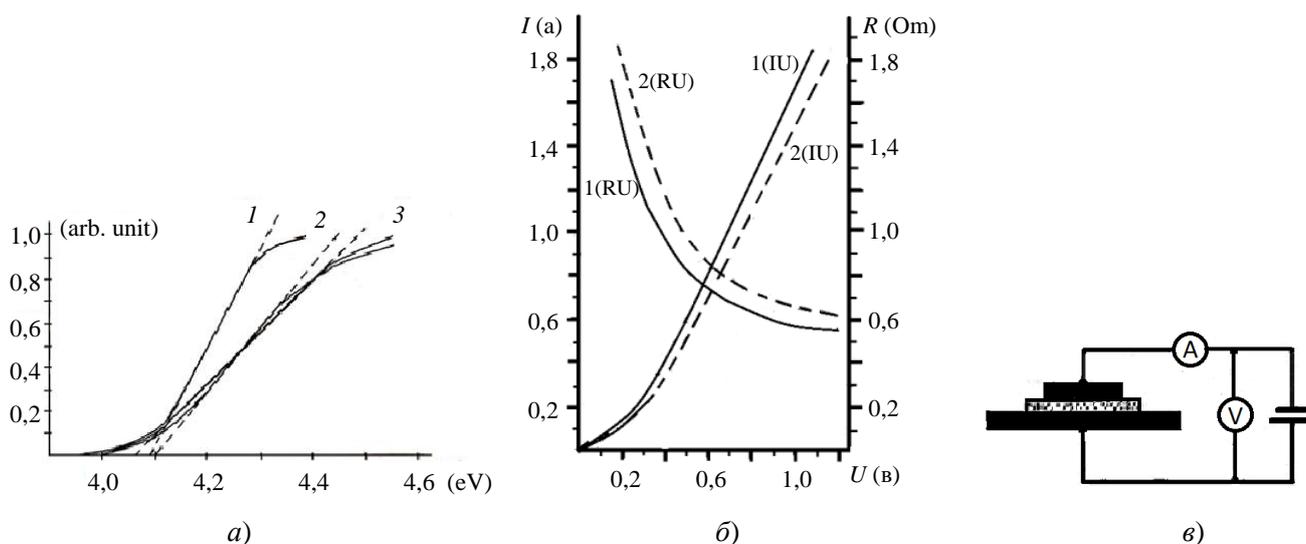


Рис. 3. а) – зависимость коэффициента поглощения от $h\nu$; б) – вольтамперные характеристики для мелкодисперсных образцов ZnS–Ag; в) – электрическая схема для получения вольтамперных характеристик образцов ZnS–Ag

На рис. 3б представлены вольтамперные характеристики для мелкодисперсных образцов ZnS–Ag и промышленного образца (кривые 1(IU) и 2(IU) соответственно). Из графика видно, что вольтамперная характеристика 1(IU) имеет более крутой наклон, чем 2(IU). Различие наблюдается и для графиков зависимости сопротивления от приложенного напряжения 1(RU) и 2(RU). Различие вольтамперных характеристик для промышленного 2(IU) и мелкодисперсных образцов 1(IU) можно объяснить тем, что уменьшение размеров кристаллов ведёт к увеличению ширины запрещённой зоны, это, в свою очередь, ведёт к изменению сопротивления полупроводника. На рис. 3в показана электрическая схема для получения вольт-амперных характеристик образца ZnS–Ag. Образец помещался между пластинами из нержавеющей стали. На металлические пластины подавалось

напряжение с интервалом 0,1 В, затем с вольтметра и амперметра снимались показания. По данным УФ-спектроскопии ультрадисперсные кристаллы ZnS–Ag прозрачны в видимом диапазоне длин волн. Поляризация луча света при прохождении через исследуемые образцы ZnS–Ag тоже показала различие между образцами. Так, луч света пройдя образец из исходного материала имел степень поляризации $P = 0,094$. Для образца, полученного путём осаждения наночастиц обычным способом, степень поляризации прошедшего луча составила $P = 0,110$. И для образца, приготовленного из мелкодисперсных частиц ZnS–Ag, осажженных в электрическом поле, степень поляризации прошедшего светового луча оказалась $P = 0,117$. Степень поляризации определялась по известной формуле:

$$P = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}.$$

Заключение

Получены спектральные характеристики при возбуждении ZnS–Ag ультрафиолетом ($\lambda_{\max} = 365$ нм). Анализ спектров показал, что уменьшение размеров кристаллов ZnS–Ag до наноразмерных величин существенно не влияет на форму спектральных линий при возбуждении ультрафиолетом. Однако при возбуждении ультрафиолетом спектральные характеристики имели отличие для образцов с различной размерностью кристаллов. Так для промышленного образца спектр люминесценции имел полосу с $\lambda_{\max} = 453$ нм, а для ультрадисперсных кристаллов ZnS–Ag, осаждённых на подложку обычным способом спектральная полоса имела $\lambda_{\max} = 452,4$ нм. Максимум спектральной полосы ультрадисперсных кристаллов ZnS–Ag, осаждённых на подложку в электрическом поле был 451,5 нм. Это указывает на то, что размерность кристаллов люминофора влияет на спектральные характеристики фотолюминесценции. При измерении ширины запрещённой зоны была установлена зависимость ширины запрещённой зоны от размеров кристаллов люминофора. Ширина запрещённой зоны увеличивается при уменьшении размеров кристаллов до наноразмерных величин. Более значительный эффект был получен при осаждении на подложку наноразмерных кристаллов в электрическом поле. Так для промышленного образца ширина запрещённой зоны составила 4,06 эВ, а для осаждённых обычным способом и в электрическом поле 4,09 и 4,10 эВ соответственно. Поляризация света при прохождении светового луча через образцы тоже показала различие между образцами. Так, луч света пройдя образец из исходного материала имел степень поляризации $P = 0,094$. Для образца, полученного путём осаждения наночастиц обычным способом, степень поляризации прошедшего луча составила $P = 0,110$. И для образца, приготовленного из мелкодисперсных частиц ZnS–Ag, осаждённых в электрическом поле, степень поляризации прошедшего светового луча оказалась $P = 0,117$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kryshab T. G., Khomchenko V. S., Andraca-Adame J. A., Savin A. K., Kryvko A. V., Juarez G., Pena-Sierra R. / Journal of Luminescence. 2009. Vol. 129. № 12. P. 1677–1681.
2. Ma X., Song J., Yu Z. / Thin Solid Films. 2011. Vol. 519. № 15. P. 5043–5045.
3. Peng H., Liuyang B., Lingjie Y., Jinlin L., Fangli Y., Yunfa C. / Nanoscale Res. Lett. 2009. Vol. 4. № 9. P. 1047–1053.
4. Sadovnikov S. I., Kozlova E. A., Gerasimov E. Yu., Rempel A. A., Gusev A. I. / Int. J. Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42 (40). P. 25258–25266.
5. Liu L., Hu S., Dou Y.-P., Liu T., Lin J., Wang Y. / J. Nanotechnol: 2015. Vol. 6. P. 1781–1787.
6. Kamakshi P., Deshpande M. P., Chaki S. H. / Appl. Phys. A. 2017. Vol. 123. P. 367–373.
7. Софронов Д. С., Беликов К. Н., Камнева Н. Н., Брылева Е. Ю., Булгакова А. В., Чебанов В. А. / Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т. 14 (1). С. 159–165.
8. Chandrakar R. K., Baghel R. N., Chandra V. K., Chandra B. P. / Superlattices and microstructures. 2015. Vol. 84. P. 132–143.
9. Kumar S., Chen C. L., Dong C. L. et al. / J. Alloys. Comp. 2013. Vol. 554. P. 357–362.
10. Prasanth S., Irshad P., Raj D. R., Vineeshkumar T. V., Philip R., Sudarsanakumar C. / J. Lumin. 2015. Vol. 166. P. 167–175.
11. Sadovnikov S. I. / RUSS CHEM REV. 2019. Vol. 88 (6). P. 571–593.
12. Sadovnikov S. I., Gusev A. I., Rempel A. A. Semiconductor nanostructures of lead, cadmium and silver sulfides. – М.: Fizmatlit, 2018.
13. Tyutyunnikov V. I. / East European Journal of Physics. 2015. Vol. 2 (3). P. 64–69.
14. Sadovnikov S. I., Ishchenko A. V., Vainshtein I. A. / Journal of inorganic chemistry. 2020. Vol. 65 (9). P. 1183–1191.
15. Kulak A. I., Streltsov E. A., Rabchynski S. M. Band gap determination of semiconductor electrodes from photopotential spectrum. 2011. – Sviridov Readings. 7. – Minsk: 1–10.
16. Troshin A. V., Kovalenko A. A., Dorofeev S. H. / Inorganic materials. 2012. Vol. 48 (7). P. 1–8.
17. Malyshev K. V. / Science and education. 2011. Vol. 10. P. 1–13.
<http://technomag.edu.ru/pdf/out/228079.pdf>
18. Shirokov V. P., Biryukov S. V., Mukhortov V. M., Yuzyuk Y. I. / Technical Physics. 2011. Vol. 81 (8). P. 115–121.
19. Tyutyunnikov V. I. / East Eur. J. Phys. 2016. Vol. 3 (4). P. 66–71.
20. Gusev A. I. Nanomaterials technology structure. – М.: FIZMATLIT, 2005.
21. Ivanov M. S., Kastrylina T. G., Soloviev V. G., Filippov V. A., Gerbreder V. I., Ogurcov A. S. / Vestnik Pskov GU Series Natural, physical and mathematical sciences. 2014. Vol. 4. P. 153–161.

Spectral characteristics of fine crystals ZnS-Ag deposited from aqueous solution on a substrate in the electric field

V. I. Tyutyunnikov

Priazovsky State Technical University, Department of Physics
7 Universitetskaya st., Mariupol, 287500, Russia
E-mail: vladimir-tjutjunnikov@rambler.ru

Received 10.03.2023; revised 7.06.2023; accepted 15.06.2023

In this work, we studied the spectra of ultrafine ZnS–Ag particles deposited on a substrate from an aqueous solution in an electric field. To obtain fine particles, an industrial phosphor K-75 (ZnS–Ag) was used. The colloidal solution was kept in a test tube for several days until the water was completely transparent. After that, the solution from the top of the test tube was used for research. The emulsion was deposited on a stainless steel substrate or quartz glass plates, then the water was removed by evaporation. The temperature of the substrate, when water was removed, was maintained within the range of 60–65 °C. This mode of evaporation makes it possible to more effectively remove water from the sample and, at the same time, does not contribute to the formation of convective flows that do not allow particles to be fixed in a certain position. Luminescence spectra were obtained by exposing the sample to ultraviolet light ($\lambda = 365$ nm). An analysis of the spectra showed that the spectral characteristics differ for samples with different crystal sizes. So for an industrial sample, the luminescence spectrum had a band with $\lambda_{\max} = 453$ nm with a half-width $\Delta\lambda = 58.5$ nm. For ultrafine ZnS–Ag crystals deposited in the usual way, the spectral band had $\lambda_{\max} = 452.4$ nm with a half-width $\Delta\lambda = 58.0$ nm. The photoluminescence spectra of samples, obtained by deposition of ultrafine ZnS–Ag crystals in an electric field on a substrate, have parameters with $\lambda_{\max} = 451.5$ nm and with a half-width $\Delta\lambda = 57.6$ nm. When measuring the band gap, the dependence of the band gap on the size of semiconductor crystals was established. The most noticeable effect was obtained when nanosized crystals were deposited on a substrate in an electric field. So for an industrial sample, the band gap was 4.06 eV, and for samples deposited in the usual way and in an electric field – 4.09 and 4.10 eV, respectively. The results obtained show that the band gap increases with a decrease in the size of crystals to nanoscale values. The polarization of light during the passage of a light beam through the samples also showed different results. Thus, the light beam passing through the sample from the initial material had the degree of polarization $P = 0.094$. For a sample obtained by deposition of nanoparticles in the usual way, the degree of polarization of the transmitted beam was $P = 0.110$. And for a sample prepared from fine ZnS–Ag particles deposited in an electric field, the degree of polarization of the transmitted light beam turned out to be $P = 0.117$. The results obtained show that materials obtained from fine particles by their deposition in an electric field have some differences in physical parameters.

Keywords: spectrum, ultrafine crystals, photoluminescence, electric field.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-107-114

REFERENCES

1. Kryshchab T. G., Khomchenko V. S., Andraca-Adame J. A., Savin A. K., Kryvko A. V., Juarez G. and Pena-Sierra R., *Journal of Luminescence* **129** (12), 1677–1681 (2009).
2. Ma X., Song J. and Yu Z., *Thin Solid Films* **519** (15), 5043–5045 (2011).
3. Peng H., Liuyang B., Lingjie Y., Jinlin L., Fangli Y. and Yunfa C., *Nanoscale Res. Lett.* **4** (9), 1047–1053 (2009).
4. Sadovnikov S. I., Kozlova E. A., Gerasimov E. Yu., Rempel A. A. and Gusev A. I., *Int. J. Hydrogen Energy*, **42** (40), 25258–25266 (2017).
5. Liu L., Hu S., Dou Y.-P., Liu T., Lin J. and Wang Y., *J. Nanotechnol* **6**, 1781–1787 (2015).
6. Kamakshi P., Deshpande M. P. and Chaki S. H., *Appl. Phys. A*, **123**, 367–373 (2017).
7. Sofronov D. S., Belikov K. N., Kamneva N. N., Bryleva E. Yu., Bulgakova A. V. and Chebanov V. A., *Sorption, and chromatographic processes* **14** (1), 159–165 (2014).
8. Chandrakar R. K., Baghel R. N., Chandra V. K. and Chandra B. P., *Superlattices and microstructures* **84**, 132–143 (2015).
9. Kumar S., Chen C. L., Dong C. L. et al., *J. Alloys. Comp.* **554**, 357–362 (2013).
10. Prasanth S., Irshad P., Raj D. R., Vineeshkumar T. V., Philip R. and Sudarsanakumar C., *J. Lumin.* **166**, 167–175 (2015).
11. Sadovnikov S. I., *RUSS CHEM REV.* **88** (6), 571–593 (2019).
12. Sadovnikov S. I., Gusev A. I. and Rempel A. A., *Semiconductor nanostructures of lead, cadmium and silver sulfides*, Moscow, Fizmatlit, 2018.
13. Tyutyunnikov V. I., *East European Journal of Physics* **2** (3), 64–69 (2015).
14. Sadovnikov S. I., Ishchenko A. V. and Vainshtein I. A., *Journal of inorganic chemistry* **65** (9), 1183–1191 (2020).
15. Kulak A. I., Streltsov E. A. and Rabchynski S. M., *Band gap determination of semiconductor electrodes from photopotential spectrum. 2011. Sviridov Readings. 7. – Minsk: 1–10.*
16. Troshin A. V., Kovalenko A. A. and Dorofeev S. H., *Inorganic materials* **48** (7), 1–8 (2012) [in Russian].
17. Malyshev K. V., *Science and education* **10**, 1–13 (2011). <http://technomag.edu.ru/pdf/out/228079.pdf>
18. Shirokov V. P., Biryukov S. V., Mukhortov V. M. and Yuzyuk Y. I., *Technical Physics*, **81** (8), 115–121 (2011) [in Russian].
19. Tyutyunnikov V. I., *East Eur. J. Phys.* **3** (4), 66–71 (2016).
20. Gusev A. I., *Nanomaterials technology structure*, Moscow, FIZMATLIT, 2005 [in Russian].
21. Ivanov M. S., Kastrulina T. G., Soloviev V. G., Filippov V. A., Gerbreder V. I. and Ogurcov A. S., *Vestnik Pskov GU Series Natural, physical and mathematical sciences* **4**, 153–161 (2014) [in Russian].