

ФИЗИКА. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 536.46

DOI 10.52575/2687-0959-2022-54-1-52-59

ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ ZnS_xSe_{1-x} , СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

Е. Г. Плахтий, В. С. Захвалинский

(Статья представлена членом редакционной коллегии С. В. Блажевичем)

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, 308015, Россия

E-mail: plakhtii.ev@gmail.com

Аннотация. Методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза получены нанокристаллы твердых растворов ZnS_xSe_{1-x} . Полученная шихта представляет собой объединение нанокристаллов и поликристаллов. Поликристаллы образуются из-за высокой температуры реакции и невозможности мгновенного отведения тепла. Присутствует нелинейная зависимость заложенной шихты до синтеза и полученного после синтеза порошка. Рассчитаны размеры нанокристаллов ZnS_xSe_{1-x} методом Дебая – Шеррера. Максимальные размеры составили для сульфида и селенида цинка 80 ± 5 нм и для всех остальных составов 60 ± 5 нм. Полученные нами степени микронапряжения и плотности дислокаций в нанокристаллах ZnS_xSe_{1-x} характерны для однородных составов с высоким совершенством кристаллической структуры. Нанокристаллы для всех параметров x характеризуются присутствием гексагональной и кубической фазы. При уменьшении параметра x в нанокристаллах твердых растворов ZnS_xSe_{1-x} доля кубической фазы возрастает. Локальное окружение примесных ионов Mn^{2+} зависит от состава твердого раствора. В ZnS_xSe_{1-x} состава $0.4 \leq x \leq 1$ ионы Mn^{2+} окружены ионами серы с константой сверхтонкой структуры $A = 6.88 \div 6.91$ мТл, а в составах с $x \leq 0.2$ ионы Mn^{2+} находятся в окружении ионов селена с константой сверхтонкой структуры $A = 6.55$ мТл. В неосвещенных нанокристаллах ZnS_xSe_{1-x} составов $0.8 \leq x \leq 1$ присутствует одиночная линия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) ионов Cr^{3+} с фактором $g = 1.9998$.

Ключевые слова: нанокристаллы ZnS_xSe_{1-x} , самораспространяющийся высокотемпературный синтез, рентгенодифракционный анализ, кристаллическая структура, спектры ЭПР

Для цитирования: Плахтий Е. Г., Захвалинский В. С. 2022. Получение и свойства нанокристаллов ZnS_xSe_{1-x} , синтезированных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Прикладная математика & Физика. 54(1): 52–59. DOI 10.52575/2687-0959-2022-54-1-52-59

OBTAINING AND PROPERTIES OF ZnS_xSe_{1-x} NANOCRYSTALS SYNTHETIZED BY COMBUSTION SYNTHESIS

Evgenii Plakhtii, Vasily Zakhvalinskii

(Article submitted by a member of the editorial board S. V. Blazhevich)

Belgorod National Research University, Belgorod, 308015, Russia)

E-mail: plakhtii.ev@gmail.com

Received February, 04, 2021

Abstract. We obtained nanocrystals of ZnS_xSe_{1-x} solid solutions by the combustion synthesis. The obtained charge is a combination of nanocrystals and polycrystals. The high reaction temperature and the impossibility of instantaneous heat removal form polycrystals. There is a nonlinear dependence of the incorporated charge before synthesis and the powder obtained after synthesis. The sizes of ZnS_xSe_{1-x} nanocrystals are calculated by the Debye-Scherrer method. The maximum dimensions were 80 ± 5 nm for zinc sulfide and selenide and 60 ± 5 nm for all other compositions. The obtained degrees of microstress and dislocation density in ZnS_xSe_{1-x} nanocrystals are typical for homogeneous compositions with a high perfection of the crystal structure. Nanocrystals for all parameters x are characterized by the presence of a hexagonal and cubic phase. The fraction of the cubic phase increases with a decrease in the parameter x in nanocrystals of ZnS_xSe_{1-x} solid solutions. The local environment of Mn^{2+} impurity ions depends on the composition of the solid solution. Sulfur ions with a hyperfine structure constant $A = 6.88 \div 6.91$ mT surround Mn^{2+} ions in ZnS_xSe_{1-x} of composition $0.4 \leq x \leq 1$, and selenium ions with a hyperfine structure constant $A = 6.55$ mT surround Mn^{2+} ions in compositions with $x \leq 0.2$. There is a single line of electron paramagnetic resonance (EPR) of Cr^{3+} ions with a factor $g = 1.9998$ in unilluminated ZnS_xSe_{1-x} nanocrystals with compositions $0.8 \leq x \leq 1$.

Key words: ZnS_xSe_{1-x} nanocrystals, combustion synthesis, X-ray diffraction analysis, crystal structure, EPR spectra

For citation: Plakhtii Evgenii, Zakhvalinskii Vasily. 2022. Obtaining and properties of ZnS_xSe_{1-x} nanocrystals synthesized by combustion synthesis. *Applied Mathematics & Physics*. 54(1): 52–59. (in Russian)
DOI 10.52575/2687-0959-2022-54-1-52-59

1. Введение. Твердые растворы (ТР) ZnS_xSe_{1-x} широко используются в твердотельной электронике, оптоэлектронике, акустоэлектронике, технике [7, 19, 23]. Эти соединения имеют ширину запрещенной зоны 2,6 – 3,91 эВ и являются перспективным материалом для оптоэлектронных приборов. Все химические элементы, их составляющие, нетоксичны и в изобилии имеются в земной коре. В последнее время применение данных твердых растворов в основном происходит в виде нанокристаллов (НК) [3, 5, 9]. Многие группы исследователей получают НК ZnS_xSe_{1-x} с помощью широкого спектра методов из газовой фазы (gas-based techniques): химического осаждения из паровой фазы (CVD), физического осаждения из паровой фазы (PVD), ионной имплантации (ion implantation), распыления (sputtering), лазерной абляции (laser ablation) и пиролиза аэрозоля (spray pyrolysis) [1, 2, 10, 16]. В этих технологиях возможность управления размером НК обеспечивают, регулируя параметры синтеза: температуру, давление, удельную мощность, расход газа и т. д. Также используются методы роста НК из растворов (solution-based techniques): восстановления (reduction), термического разложения (thermal decomposition), гидротермального процесса (hydrothermal process), печати (printing), а также используются основанные на гидролизе и алкоголизе (hydrolysis and alcoholysis) [8, 21, 24, 28]. Эти методы получения растворов представляют большой исследовательский интерес, так как они эффективны в синтезе НК с хорошим контролем размера, у них есть преимущества низкой температуры синтеза, технологической гибкости. Однако получение НК всеми перечисленными выше методами имеют некоторые недостатки, например, большую себестоимость и достаточно высокую сложность синтеза. Метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) является одним из самых перспективных методов получения НК для соединений типа A_2B_6 и обладает рядом преимуществ. Этот метод характеризуется высокой скоростью получения НК, возможностью получения НК в больших объемах, низкой себестоимостью и энергопотреблением на единицу продукции, простотой используемого оборудования и его экологической безопасностью [15, 22]. Метод СВС позволяет получить порошкообразные НК ZnS_xSe_{1-x} путем легко реализуемой высокотемпературной реакции смеси мелкодисперсных порошков Zn, S и Se, производить легирование НК непосредственно в процессе синтеза путем добавления соответствующих примесей в шихту. На сегодняшний день группами исследователей получены методом СВС и изучены некоторые физические и оптические свойства нанокристаллов ZnS с размерами 80 – 1000 нм [4, 14, 20], а также получены кристаллы ZnSe размерами 1 – 100 мкм и частично исследованы физические и оптические свойства [18, 27]. Ранее нами были рассмотрены НК ZnS_xSe_{1-x} легированные марганцем [12, 13]. Однако получению чистых НК ZnS_xSe_{1-x} методом СВС и некоторых присущих им особенностей до сих пор не было уделено достаточно внимания. В данной статье рассматривается получение НК ZnS_xSe_{1-x} с шагом параметра состава $x = 0.2$ меньших размеров, с воспроизведенными и контролируемыми свойствами и низкой себестоимостью, преодолевающей ограничение дальнейшего расширения практического применения ТР НК ZnS_xSe_{1-x} .

2. Методика эксперимента. Синтез НК твердых растворов ZnS_xSe_{1-x} с шагом состава $x = 0.2$ производился в кварцевой ампуле, помещенной в герметичный стальной реактор. В ампулу загружали механически смешанные порошки Zn, S и Se, взятые в соответствующих пропорциях. Предварительное перемешивание шихты проводилось с добавлением этилового спирта для улучшения процесса перемешивания. Соотношение S и Se в шихте при этом характеризуется параметром x_p . После сушки смеси инициация реакции синтеза проводилась тепловым импульсом, который обеспечивала нихромовая спираль, расположенная в верхней части реактора.

Синтез проводился при атмосферном давлении в воздушной среде. В полученных НК ZnS_xSe_{1-x} соотношение между S и Se определялось параметром x . Рентгенодифракционный анализ (РДА) полученных НК был проведен на дифрактометре ДРОН-2 с использованием излучения $Co K\alpha$. Спектры ЭПР исследовались на радиоспектрометре RadiopanSE/X – 2543. Изображение частиц НК было получено с помощью растрового электронного микроскопа РЕММА – 102 – 02.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение. НК ZnS_xSe_{1-x} , полученные методом СВС, представляют собой порошок. Электронные микрофотографии данного порошка представлены на рис. 1. Как видно из представленных электронных микрофотографий, в данном порошке присутствуют крупные поликристаллы, поликристаллы со средними размерами 1 – 5 мкм и мелкие НК, которые можно увидеть при разрешении 5 мкм как легкую взвесь. Появление разных фракций происходит из-за особенностей реакции СВС – высоких температур синтеза $\sim 1800 - 2200$ К [17]. В связи с невозможностью мгновенного отвода избыточного тепла, образованные в результате синтеза НК соединяются в поликристаллы разных фракций со смешанной кристаллической структурой, которые при механическом давлении легко распадаются на НК.

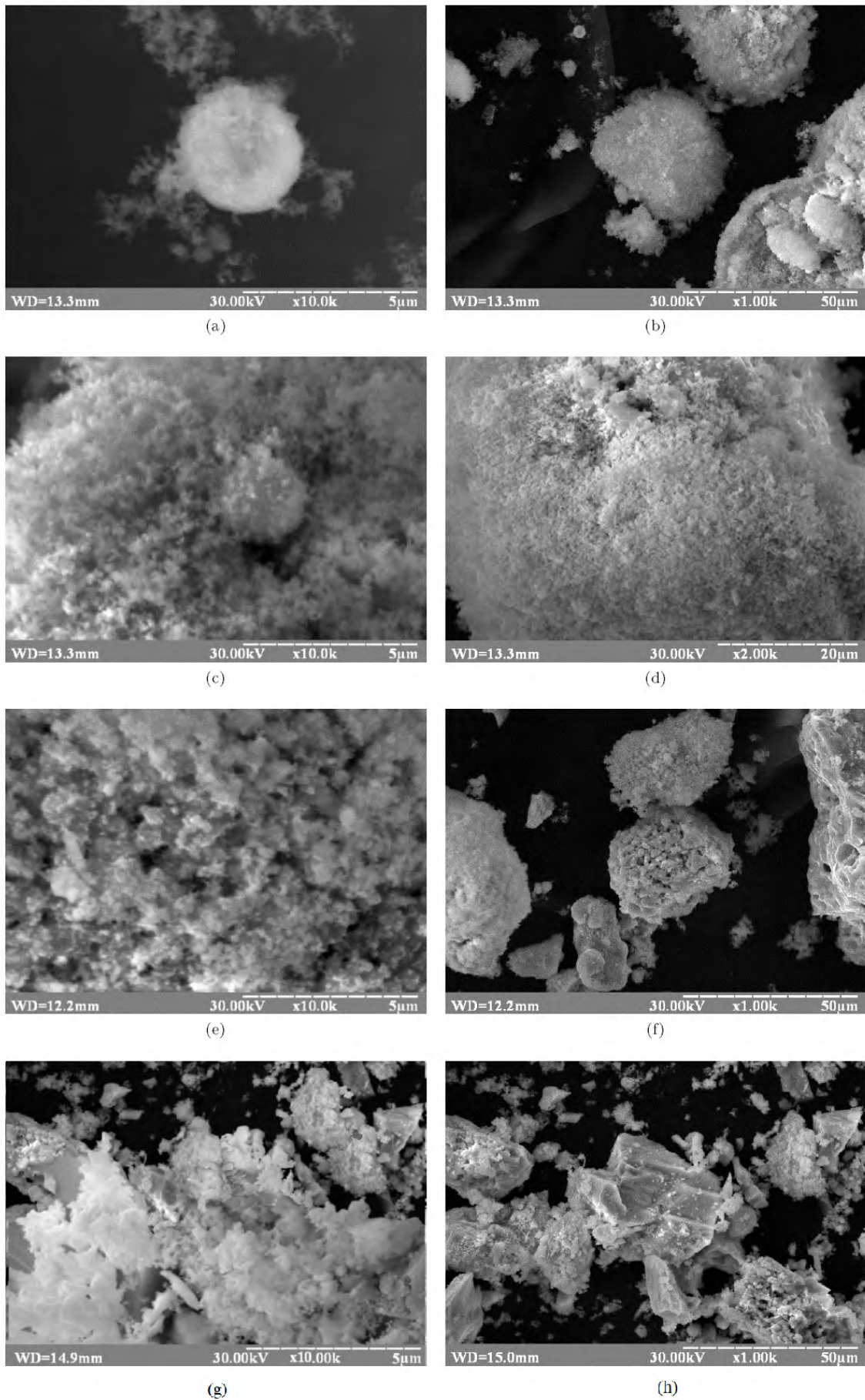


Рис. 1. Электронные микрофотографии Zn (a, b), $ZnS_{0.4}Se_{0.6}$ (c, d), $ZnS_{0.2}Se_{0.8}$ (e, f), $ZnSe$ (g, h)
 Fig. 1. Electron micrographs of ZnS (a, b), $ZnS_{0.4}Se_{0.6}$ (c, d), $ZnS_{0.2}Se_{0.8}$ (e, f), $ZnSe$ (g, h) NC

Для расчета размеров НК была использована формула Дебая – Шеррера:

$$d = \frac{K\lambda}{\beta \cos(\theta)}, \quad (1)$$

где d – средний размер кристаллов, K – безразмерный коэффициент формы частиц (постоянная Шеррера, для сферических частиц принимается равной 0,9), λ – длина волны рентгеновского излучения, β – ширина рефлекса в районе полувысоты (в радианах), θ – угол дифракции. Размеры НК ZnS_xSe_{1-x} , полученные из данных РДА приведенных на рис. 2 для составов $x = 0$, $x = 1$, находятся в пределах 80 ± 5 нм, а для всех остальных составов 60 ± 5 нм. Как видим по ширине рефлексов, минимальные размеры НК ZnS_xSe_{1-x} характерны для параметра $x = 0.4$, а максимальные – для состава $x = 0$. На рис. 2b представлена расширенная область рентгенограмм от 28 до 38, где проявляется плавное движение рефлексов при изменении параметра состава x , что подтверждает получение ТР НК ZnS_xSe_{1-x} .

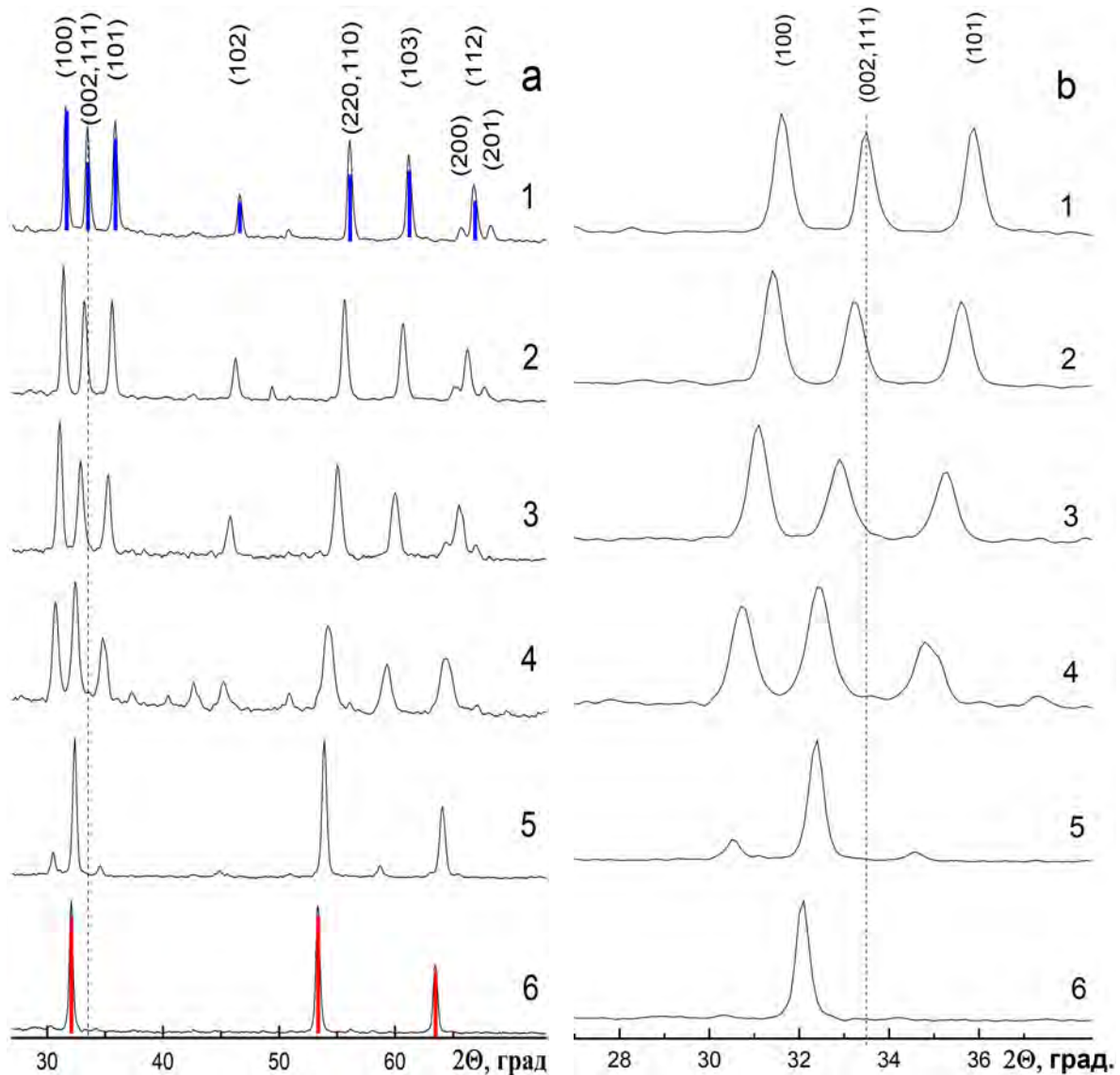


Рис. 2. Спектр РДА (а) и часть спектра РДА (б) НК ZnS_xSe_{1-x} : 1 – $x = 1$; 2 – $x = 0.8$; 3 – $x = 0.6$; 4 – $x = 0.4$; 5 – $x = 0.2$; 6 – $x = 0$. Эталонная штрих-диаграмма для вюрцита ($x = 1$, синий цвет) и сфалерита ($x = 0$, красный цвет)

Fig. 2. XRD spectrum (a) and part of XRD spectrum (b) ZnS_xSe_{1-x} NC: 1 – $x = 1$; 2 – $x = 0.8$; 3 – $x = 0.6$; 4 – $x = 0.4$; 5 – $x = 0.2$; 6 – $x = 0$. Reference line diagram for wurtzite ($x = 1$, blue) and sphalerite ($x = 0$, red)

Для определения доли гексагональной и кубической фаз были использованы соотношения интенсивностей рефлексов плоскостей (100), (101), (002) отвечающих за гексагональную фазу и интенсивностей рефлексов плоскости (111), отвечающих за кубическую. Из рис. 2 видно, что в НК ZnS доля гексагональной фазы, составляет $\sim (65 \pm 5) \%$, кубической фазы $\sim (35 \pm 5) \%$, в НК $ZnS_{0.8}Se_{0.2}$ – $(70 \pm 5) \%$ и $(30 \pm 5) \%$, в НК $ZnS_{0.6}Se_{0.4}$ – $(70 \pm 5) \%$ и $(30 \pm 5) \%$, в НК $ZnS_{0.4}Se_{0.6}$ – $(55 \pm 5) \%$ и $(45 \pm 5) \%$, в НК $ZnS_{0.2}Se_{0.8}$ – $(15 \pm 5) \%$ и $(85 \pm 5) \%$, а в НК ZnSe – $(5 \pm 5) \%$ и $(95 \pm 5) \%$, соответственно. Доля кубической фазы с уменьшением параметра x в НК ZnS_xSe_{1-x} возрастает. По данным РДА, с точностью до 2%, в полученных ТР не

наблюдается присутствие других кристаллических фаз. Реакция СВС инициировалась мощным тепловым импульсом, который обеспечивал ток ~ 40 А, в работе [6] данный тепловой импульс обеспечивал ток ~ 27 А. В работе [6] наблюдаются дополнительные фазы, в нашей работе данные фазы отсутствуют, можно сделать вывод, что величина первоначального температурного импульса, инициирующего СВС реакцию, влияет на размеры и на фазовый состав НК, что сходно с результатами, представленными другими авторами [25].

Параметры кристаллической решетки НК TP ZnS_xSe_{1-x} в кубической фазе находились в пределах от $a = 5.377$ Å (для $x = 1$) до $a = 5.630$ Å (для $x = 0$) (Таблица 1). Данные значения хорошо коррелируют с параметрами кристаллической решетки монокристаллов TP ZnS_xSe_{1-x} [26], которые находятся в пределах $a = 5,4093$ Å (для $x = 1$) до $a = 5,6687$ Å (для $x = 0$). Полученные нами параметры кристаллической решетки меньше, чем в монокристаллах, это свидетельствует о деформационных напряжениях, присущих для НК. Степени микронапряжений кристаллической решетки НК ZnS_xSe_{1-x} ($\Delta d/d$) лежали в пределах от $4.1 \cdot 10^{-4}$ до $16 \cdot 10^{-4}$. Минимальная степень микронапряжений была характерна для составов с $x = 0.8$, а максимальная – с $x = 0.4$. Плотности дислокаций лежали в пределах от $2.5 \cdot 10^{10}$ до $20 \cdot 10^{10}$. Минимальная плотность дислокаций была характерна для составов с $x = 1$ и $x = 0$, а максимальная – для составов с $x = 0.2$ и $x = 0.4$. Полученные нами степени микронапряжения и плотности дислокаций характерны для достаточно однородных составов с высоким совершенством кристаллической структуры [11], что позволяет получить широкое применение синтезированных нами НК в различных сферах практической деятельности. Как видно из таблицы 1, присутствует нелинейная зависимость заложенного состава до реакции и полученных после синтеза порошков.

Таблица 1. Данные РДА НК ZnS_xSe_{1-x}
Table 1. Data X-Ray NC ZnS_xSe_{1-x}

№	Состав до реакции СВС, S_x %	Состав после СВС, параметр решетки, Å	Состав после СВС, РДА, S_x %	L1, размер кристаллов по линии 32°, Å	L2, размер кристаллов по линии 64°, Å	L, максимальный размер кристаллов, Å	M, степень микронапряжений %, $\cdot 10^{-4}$	D, плотность дислокаций $см^{-2}$, $\cdot 10^{10}$
1	100	5.385	100	722	433	825	9,6	5,91
2	80	5.396	95.3	558	488	645	13,2	8,3
3	60	5.410	89.8	531	298	591	17,7	14,2
4	40	5.436	79.3	448	313	510	18,3	20,4
5	20	5.559	29.4	600	482	652	7,45	8,85
6	0	5.632	0	725	494	822	0,55	5,85

Спектры ЭПР НК TP ZnS_xSe_{1-x} приведены на рис. 3. Заметим, что во всех составах наблюдается сверхтонкая структура, состоящая из шести эквидистантных линий, характерных для парамагнитных центров Mn^{2+} . Для синтеза НК ZnS_xSe_{1-x} использовались химически чистые исходные материалы. В паспорте материалов присутствует марганец в количестве 10^{-2} вес. %. Лучше всего ионы Mn^{2+} встраиваются в кристаллическую решетку сульфида и селенида цинка, что можно увидеть по наиболее интенсивному сигналу. В смешанных твердых растворах интенсивность сигнала ЭПР, присущего ионам Mn^{2+} , слабее на порядок, что можно связать с неравновесностью структуры НК TP ZnS_xSe_{1-x} . В составах с $0.4 \leq x \leq 1$ наблюдается sdвоенность линий, что свидетельствует о наложении друг на друга двух спектров ЭПР ионов Mn^{2+} , находящихся в разном локальном окружении.

Гексагональному локальному окружению, скорее всего, принадлежит спектр ионов Mn^{2+} с константой сверхтонкой структуры $A = 7.16$ мТл. Кубическому локальному окружению, скорее всего, принадлежит спектр ионов Mn^{2+} с константой сверхтонкой структуры $A = 6.90$ мТл. Константы сверхтонкой структуры ионов Mn^{2+} , которые мы получили, хорошо коррелируют с константами сверхтонкой структуры ионов Mn^{2+} для объемных кристаллов и НК $ZnS_xSe_{1-x}:Mn$ [12]. В составах близких к $ZnSe$ наблюдалась одна шестерка эквидистантных линий, характерных для парамагнитных центров Mn^{2+} . По данным ЭПР, именно в этих составах скачком меняется локальное окружение ионов Mn^{2+} – они окружены ионами селена. Константа сверхтонкого расщепления скачком при этом уменьшается до величины $A = 6.55$ мТл, что коррелирует с полученными нами данными для $ZnS_xSe_{1-x}:Mn$. Это позволяет сделать заключение, что ионы Mn^{2+} , находящиеся в разном локальном окружении, проявляют себя по-разному в спектрах

ЭПР НК ZnS_xSe_{1-x} . Соответственно, спектры ЭПР также позволяют охарактеризовать наличие или отсутствие фаз в НК ZnS_xSe_{1-x} . Наличие смешанной кристаллической структуры НК ZnS_xSe_{1-x} в составах с $0.4 \leq x \leq 1$ и наличие, в основном, кубической фазы в составах с $0 \leq x \leq 0.2$, установленное нами по спектрам РДА, полностью соответствует данным ЭПР. Также наблюдается одиночная линия ЭПР с $g = 1.9998$, связанная с ионами Cr^+ . Такая же линия ЭПР была замечена и в НК $ZnS_xSe_{1-x}:Mn$ [12]. Это может свидетельствовать о том, что Cr присутствует в исходной шихте в виде неконтролируемой примеси.

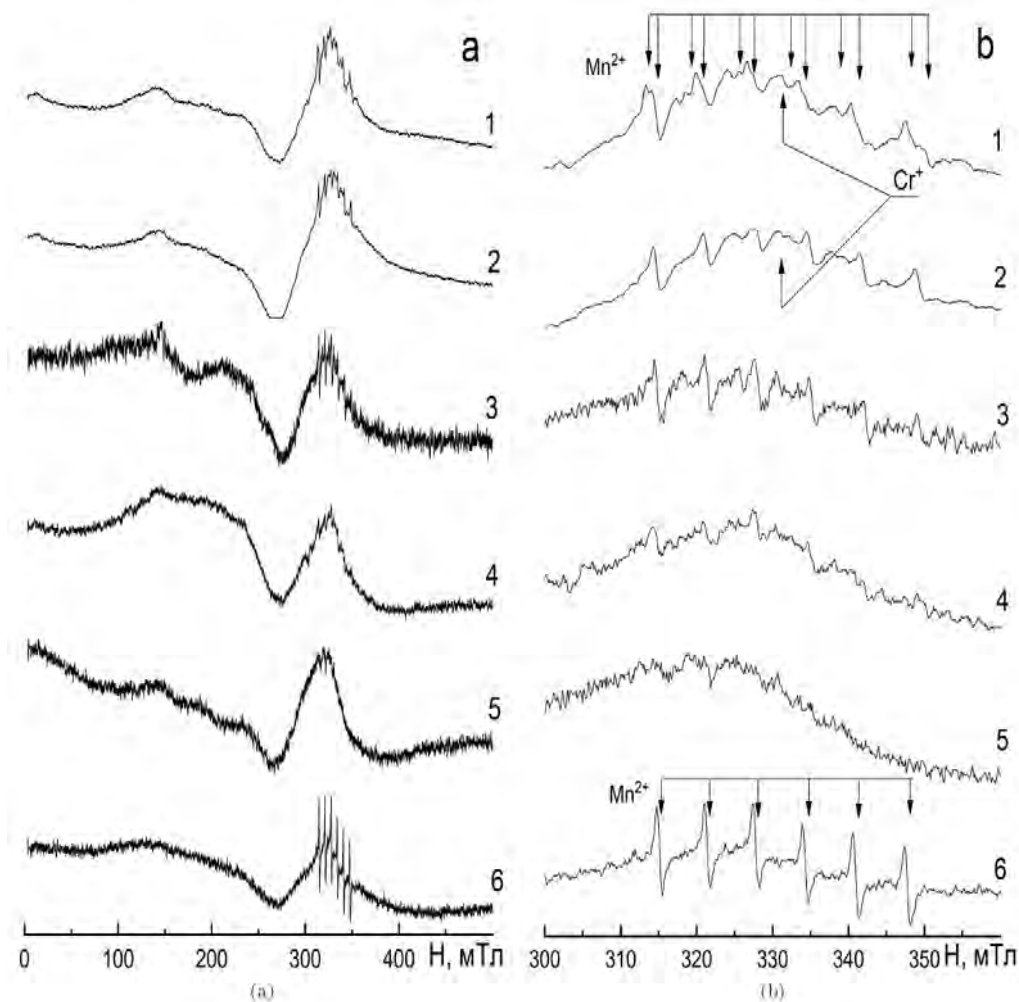


Рис. 3. Спектр (a) и часть спектра (b) ЭПР НК ZnS_xSe_{1-x} в зависимости от параметра x : 1 - $x = 1$; 2 - $x = 0.8$; 3 - $x = 0.6$; 4 - $x = 0.4$; 5 - $x = 0.2$; 6 - $x = 0$

Fig. 3. Spectrum (a) and part of the spectrum (b) EPR of NC ZnS_xSe_{1-x} depending on the parameter x : 1 - $x = 1$; 2 - $x = 0.8$; 3 - $x = 0.6$; 4 - $x = 0.4$; 5 - $x = 0.2$; 6 - $x = 0$

В спектрах ЭПР НК ZnS_xSe_{1-x} , приведенных на рис. 3 а, в составах с $0.2 \leq x \leq 0.6$ присутствуют широкие линии поглощения с центром в районе 150 мТл, они же сильно ослабленные наблюдаются для составов с $0.8 \leq x \leq 1$. Данную широкую линию поглощения можно связать с неоднородностью структуры, полученной в процессе СВС.

4. Заключение. Синтезированы НК твердых растворов ZnS_xSe_{1-x} методом СВС с шагом параметра $x = 0.2$. Присутствует нелинейная зависимость заложенной шихты до синтеза и полученного после синтеза порошка. Полученные нами степени микронапряжения и плотности дислокаций характерны для однородных составов с высоким совершенством кристаллической структуры. НК для всех параметров состава x характерно присутствие гексагональной и кубической фазы. При уменьшении параметра x в НК ТР ZnS_xSe_{1-x} доля кубической фазы возрастает. В спектрах ЭПР во всех составах наблюдается сверхтонкая структура, характерная для парамагнитных центров Mn^{2+} . В составах с $0.4 \leq x \leq 1$ наблюдается sdвоенность линий ЭПР, которая обусловлена разным локальным окружением ионов Mn^{2+} . По изменению констант сверхтонкой структуры ЭПР от величины $A = 6.88 \div 6.91$ мТл до величины $A = 6.55$ мТл можно сделать заключение, что в составах с $0.4 \leq x \leq 1$ ионы Mn^{2+} окружены ионами серы, а в составах с $x \leq 0.2$ ионы Mn^{2+} находятся в окружении ионов селена. В неосвещенных НК ZnS_xSe_{1-x} в составах с $0.8 \leq x \leq 1$ присутствует одиночная линия ЭПР ионов Cr^+ .

References

1. Ahmed N., Darwish S., Alahmari A.M. 2016. Laser ablation and laser-hybrid ablation processes: a review. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(9): 1121-1142.
2. Ardekani S.R., Aghdam A. S. R., Nazari M., Bayat A., Yazdani E., Saievar-Iranizad E. 2019. A comprehensive review on ultrasonic spray pyrolysis technique: Mechanism, main parameters and applications in condensed matter. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 141: 104631.
3. Aviles M. A., Gotor F. J. 2021. Tuning the excitation wavelength of luminescent Mn^{2+} -doped ZnS_xSe_{1-x} obtained by mechanically induced self-sustaining reaction. *Optical Materials*, 117: 111121.
4. Bacherikov Yu. Yu., Baran N. P., Vorona I. P., Gilchuk A. V., Zhuk A. G., Polishchuk Y. O., Korsunskaya N. E. 2017. Structural and optical properties of ZnS: Mn micro-powders, synthesized from the charge with a different Zn/S ratio. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28 (12): 8569-8578.
5. Brahim T., Bouazra A., Said M. 2021. Temperature, hydrostatic pressure and composition x effects on intersubband energy levels in ZnSe / ZnS_xSe_{1-x} core-shell quantum dot. *Optik*, 225: 165860.
6. Bulaniy M. F., Kovalenko A. V., Morozov A. S., Khmelenko O. V. 2017. Obtaining of nanocrystals ZnS: Mn by means of self-propagating high-temperature synthesis. *Journal of Nano-and Electronic Physics*, 9 (2): 2007-1.
7. Chen D., Wang A., Buntine M. A., Jia G. 2019. Recent Advances in Zinc - Containing Colloidal Semiconductor Nanocrystals for Optoelectronic and Energy Conversion Applications. *Chem Electro Chem*, 6(3): 4709-4724.
8. Chiu H.-C., Yeh C.-S. 2007. Hydrothermal synthesis of SnO_2 nanoparticles and their gas-sensing of alcohol. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111 (20): 7256-7259.
9. Chukavin A. I., Valeev R. G., Beltiukov A. N. 2019. Observation of excitons at room temperature in ZnS_xSe_{1-x} nanostructures embedded in a porous Al_2O_3 template. *Materials Chemistry and Physics*, 235: 121748
10. Fang X., Zhai T., Gautam U.K., Li L., Wu L., Bando Y., Golberg D. 2011. ZnS nanostructures: from synthesis to applications. *Progress in Materials Science*, 56(2): 175-287.
11. Ivashchenko M. M., Buryk, I. P., Opanasyuk, A. S., Nam, D., Cheong, H., Vaziev, J. G., Bibyk, V. V. 2015. Influence of deposition conditions on morphological, structural, optical and electro-physical properties of ZnSe films obtained by close-spaced vacuum sublimation. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 36(13-19).
12. Kovalenko A. V., Plakhtii Y. G., Khmelenko O. V. 2018. The peculiarities of the properties of ZnS_xSe_{1-x} nanocrystals obtained by self-propagating high-temperature synthesis. *Functional materials*, 4: 665 - 669.
13. Kovalenko A. V., Plakhtii Y. G., Khmelenko O. V. 2019. Research of photoluminescence spectra of ZnS_xSe_{1-x} : Mn nanocrystals obtained by method of self-propagation high-temperature synthesis. *Journal of nano-and electronic physics*, 11(4): 04031-1-04031-5.
14. Kozitskii S. V., Pisarskii V. P., Ulanova O. O. 1998. Structure and phase composition of zinc sulfide produced by self-propagating high-temperature synthesis. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 34(1): 34-39.
15. Levashov E. A., Mukasyan A. S., Rogachev A. S., Shtansky D. V. 2017. Self-propagating high-temperature synthesis of advanced materials and coatings. *International Materials Reviews*, 62(4): 203-239.
16. Lee G. J., Wu J. J. 2017. Recent developments in ZnS photocatalysts from synthesis to photocatalytic applications – A review. *Powder technology*, 318: 8-22.
17. Liu G., Chen K., Li J. 2018. Combustion synthesis: An effective tool for preparing inorganic materials. *Scripta Materialia*, 157: 167-173.
18. Liu G., Yuan X., Li J., Chen K., Li Y., Li L. 2016. Combustion synthesis of ZnSe with strong red emission. *Materials & Design*, 97: 33-44.
19. Lu J., Liu H., Sun C., Zheng M., Nripan M., Chen G. S., Subodh G. M., Zhang X., Sow C.H. 2012. Optical and electrical applications of ZnS_xSe_{1-x} nanowires-network with uniform and controllable stoichiometry. *Nanoscale*, 4(3): 976-981.

20. Markov A. A., Filimonov I. A., Poletaev A. V., Vadchenko S. G., Martirosyan K. S. 2013. Generation of charge carriers during combustion synthesis of sulfides. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 22(2) : 69-76.
21. Rakshit T., Mandal S., Mishra P., Dhar A., Manna I., Ray S. K. 2012. Optical and bio-sensing characteristics of ZnO nanotubes grown by hydrothermal method. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 12: 308–315.
22. Rogachev A. S., Mukasyan A. S. 2015. *Combustion for material synthesis: CRC Press Taylor & Francis Group* : 398.
23. Sadekar H. K., Ghule A. V., Sharma R. 2011. Bandgap engineering by substitution of S by Se in nanostructured ZnS_xSe_{1-x} thin films grown by soft chemical route for nontoxic optoelectronic device applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(18): 5525-5531.
24. Siringhaus H., Tessler N., Friend R.H. 1998. Integrated optoelectronic devices based on conjugated polymers. *Science*, 280(5370): 1741–1744.
25. Sytschev A. E., Merzhanov A. G. 2004. Self-propagating high-temperature synthesis of nanomaterials. *Russian chemical reviews*, 73(2) : 147-159.
26. Taguchi T., Kawakami Y., Yamada Y. 1993. Interface properties and the effect of strain of ZnSe/ZnS strained-layer superlattices. *Physica B: Condensed Matter*, 191(1-2): 23-44.
27. Tian Z., Chen Z., Yuan X., Cui W., Zhang J., Sun S., Liu G. 2019. Preparation of ZnSe powder by vapor reaction during combustion synthesis. *Ceramics International*, 45 (14): 18135-18139.
28. Varkey A. J., Fort A. F.. 1993. Some optical properties of silver peroxide (AgO) and silver oxide (Ag₂O) films produced by chemical-bath deposition. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 29(3): 253-259.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Получена 04.02.2022

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ


Плахтий Евгений Георгиевич – соискатель кафедры теоретической и экспериментальной физики института инженерных и цифровых технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета

 <http://orcid.org/0000-0003-3805-5026>

ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия

E-mail: plakhtii.ev@gmail.com

Захвалинский Василий Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики института инженерных и цифровых технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета

 <http://orcid.org/0000-0001-7055-8243>

ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия

E-mail: zakhvalinskii@bsu.edu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgenii Plakhtii – aspirant of the Department of Theoretical and Experimental Physics of the Institute of Engineering and Digital Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Vasily Zakhvalinsky – PhD, Professor, Professor of the Department of Theoretical and Experimental Physics of the Institute of Engineering and Digital Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia