

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

УДК 544.77.023.523

DOI 10.26456/vtchem2025.4.1

ПОЛУЧЕНИЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК СУЛЬФИДА ЦИНКА С ПОМОЩЬЮ ГАЛОГЕНЦИНКАТНЫХ 1-АЛКИЛПИРИДИНИЕВЫХ ИОННЫХ ЖИДКОСТЕЙ

А.А. Арефьев, А.Д. Кафтанов, А.Ю. Карпенков, О.Е. Журавлев

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», г. Тверь

Проведен синтез наночастиц сульфида цинка – квантовых точек из галогенцинкатных 1-алкилпиридиниевых ионных жидкостей с различной длиной алкильной цепи в катионе. Определены средние размеры наночастиц сульфида цинка методами УФ-спектроскопии, рентгеновской дифракции, атомно-силовой микроскопии и сканирующей электронной микроскопии. Изучено влияние структуры галогенцинкатных 1-алкилпиридиниевых ионных жидкостей на размер наночастиц сульфида цинка.

Ключевые слова: квантовые точки, галогенцинкатные ионные жидкости, синтез, наночастицы сульфида цинка.

Квантовыми точками (КТ) называют наночастицы полупроводников, размеры которых меньше или сопоставимы с длиной волны де Броиля. Свойства таких частиц экстремально зависят от их размера [1]. Уже сейчас квантовые точки используются в качестве биометок [2], в конструкции солнечных панелей [3], лазерных [4] и светоизлучающих устройствах [5]. Известны различные методы синтеза квантовых точек: сольватотермальный [6], золь-гель [7],sonoхимический [8], коллоидный [9] и другие. Несмотря на большое разнообразие методов получения КТ, до сих пор остается актуальным поиск наиболее дешевых, простых в исполнении, которые приводили бы к получению КТ с заданными размерами и свойствами. Одним из наиболее распространенных широкозонных полупроводников является сульфид цинка, одним из преимуществ которого являются экологичность и дешевизна относительно большинства других соединений из $A^{II}B^{VI}$ группы. Квантовых точек сульфида цинка могут быть использованы в качестве фотокатализаторов [10] и в производстве солнечных батарей нового поколения [11].

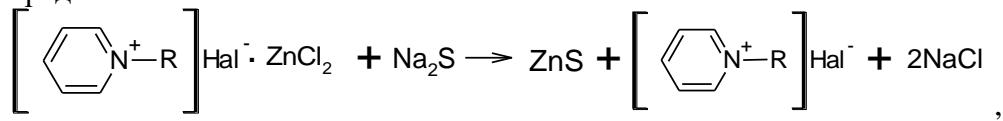
Ионные жидкости (ИЖ) это органические соли, полностью состоящие из ионов и имеющие температуры плавления, как правило,

ниже 100°C. Они не горючи, нелетучи, малотоксичны и обладают повышенной термической стабильностью. Путем варьирования структуры и природы катиона и аниона возможно изменение свойств таких соединений в широком диапазоне [12]. Ионные жидкости с длинноцепочечными алкильными заместителями в катионе могут выступать в качестве стабилизаторов золей наночастиц [13], проявляя поверхностную активность. Их адсорбция на поверхности КТ увеличивает агрегативную устойчивость золя, предотвращает рост более крупных частиц, а также уменьшает их склонность к фотоокислению. Известно, что при использовании ИЖ в качестве стабилизаторов золей наночастиц существенное влияние на размер и морфологию оказывает структура катиона и аниона ионной жидкости [13-15].

Цель работы – синтез квантовых точек сульфида цинка с использованием цинксодержащих 1-алкилпиридиниевых ионных жидкостей и установление влияния структуры ионной жидкости на размеры полученных наночастиц.

Обсуждение результатов

Для получения наночастиц сульфида цинка в качестве прекурсоров использованы галогенцинкатные ионные жидкости с катионом 1-алкилпиридиния. Длина алкильной цепи варьировалась от 4 до 12 атомов углерода. В общем виде схема синтеза наночастиц представлена на схеме:



где R: C₄H₉, C₈H₁₇, C₁₀H₂₁, C₁₂H₂₅.

Hal: Cl, Br.

Выбор пиридиниевых ионных жидкостей обусловлен тем, что органический катион в их составе содержит ароматическое ядро, которое может участвовать в стекинг-взаимодействиях. Алифатические длинноцепочечные заместители могут участвовать в Ван-дер-Ваальсовых взаимодействиях, а протоны кольца пиридина в положении 2 и 4 обладают повышенной кислотностью и склонны к образованию водородных связей. За счет такого комплекса межмолекулярных взаимодействий формируется особая молекулярная структура ионных жидкостей, что оказывает влияние, в частности, на процессы формирования и устойчивость наночастиц.

Для оценки среднего размера наночастиц сульфида цинка в золях по величине сдвига края фундаментального поглощения спектральным

методом [16] были записаны спектры поглощения в УФ-области золей сульфида цинка. Графически находилась длина волны максимума поглощения, и рассчитывалось значение энергии E_i , которая применялась для расчета размера наночастиц в золе по формуле (1) с использованием эффективной модели Бруса [17,18]:

$$\Delta E = E_i - E_g = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2R^2} \left[\frac{1}{m_e^* m_0} + \frac{1}{m_h^* m_0} \right], \quad (1)$$

где ΔE – зависимость между шириной «запрещенной зоны» наночастицы (E_i) и шириной «запрещенной зоны» массивного кристалла (E_g) (в случае ZnS $E_g=3,65$ эВ); \hbar – приведенное значение постоянной Планка ($\hbar=h/2\pi$ эВ*с); m_e^* и m_h^* – эффективные массы электрона в зоне проводимости и дырок в валентной зоне ($m_e^*=0,34$, $m_h^*=0,5$), m_0 – масса покоя электрона, равная $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Расчет размеров наночастиц полупроводников по формуле (1) возможен только в том случае, если размер частиц составляет не более 35 нм, что соответствует полосе поглощения в УФ-спектре 340 нм.

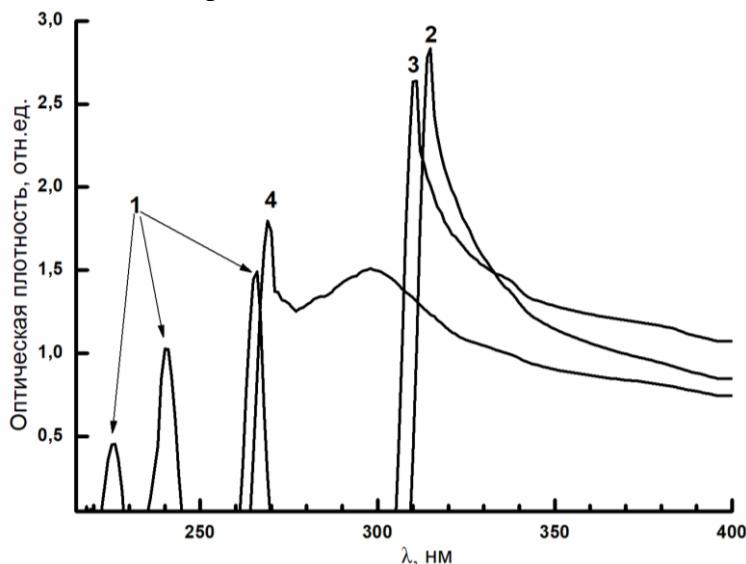


Рис. 1. Спектры УФ-поглощения золей сульфида цинка, полученных из хлорцинкатных ионных жидкостей (1-ИЖ-1; 2-ИЖ-2, 3-ИЖ-3; 4-ИЖ-4).

На рис. 1 представлены спектры поглощения золей сульфида цинка с концентрациями 5 ммоль/л. Наличие в УФ-спектрах золей сульфида цинка единственной полосы поглощения указывает на низкую полидисперсность золей, полученных с использованием ионных

жидкостей с 1-декил- и 1-октилпиридиний катионом (ИЖ-2 и ИЖ-3 соответственно). Использование в качестве прекурсоров ионных жидкостей с катионами 1-бутил- (ИЖ-4) и 1 – додецилпиридиния (ИЖ-1) приводит к смещению полос поглощения в коротковолновую область УФ-спектра, что свидетельствует об уменьшении размеров наночастиц. Кроме того, наблюдается появление нескольких полос поглощения в спектре золей, что свидетельствует о полидисперсности систем. В таблице 1 представлены структуры ионных жидкостей, длины волн поглощения в УФ-области спектра и рассчитанные по формуле (1) средние размеры наночастиц сульфида цинка в золе. Из полученных данных следует, что наименьшие размеры наночастиц в золе (2,0–2,7 нм) достигаются при использовании в качестве прекурсора ИЖ-1. Не прослеживается четкой зависимости между размером катиона в структуре ИЖ и размером наночастиц сульфида цинка в золях. Наибольшие размеры наночастиц в золи (5,0 нм) наблюдаются при использовании ИЖ-2.

Таблица 1.

Средние размеры наночастиц сульфида цинка, полученные по данным УФ-спектроскопии

№	Ионная жидкость	λ , нм	d , нм $\pm 0,1$ нм
1	$\left[\text{C}_6\text{H}_5\text{N}^+ - \text{C}_{12}\text{H}_{25} \right] \text{Br}^- \cdot \text{ZnCl}_2$ <p style="text-align: center;">ИЖ-1</p>	225 241 266	2,0 2,2 2,7
2	$\left[\text{C}_6\text{H}_5\text{N}^+ - \text{C}_{10}\text{H}_{21} \right] \text{Cl}^- \cdot \text{ZnCl}_2$ <p style="text-align: center;">ИЖ-2</p>	315	5,0
3	$\left[\text{C}_6\text{H}_5\text{N}^+ - \text{C}_8\text{H}_{17} \right] \text{Br}^- \cdot \text{ZnCl}_2$ <p style="text-align: center;">ИЖ-3</p>	269 298	2,8 3,8
4	$\left[\text{C}_6\text{H}_5\text{N}^+ - \text{C}_4\text{H}_9 \right] \text{Br}^- \cdot \text{ZnCl}_2$ <p style="text-align: center;">ИЖ-4</p>	311	4,6

Наличие в золях наночастиц с размерами 2–5 нм может быть обусловлено стабилизирующим действием катионов 1-алкилпиридиния, которые могут адсорбироваться на поверхности образующихся зародышей нанокристаллов сульфида цинка и тем самым препятствовать их дальнейшему росту и агрегации. Для подтверждения данной гипотезы был использован метод ИК-спектроскопии, и записаны спектры сульфида цинка, выделенного из золей (рис. 2).

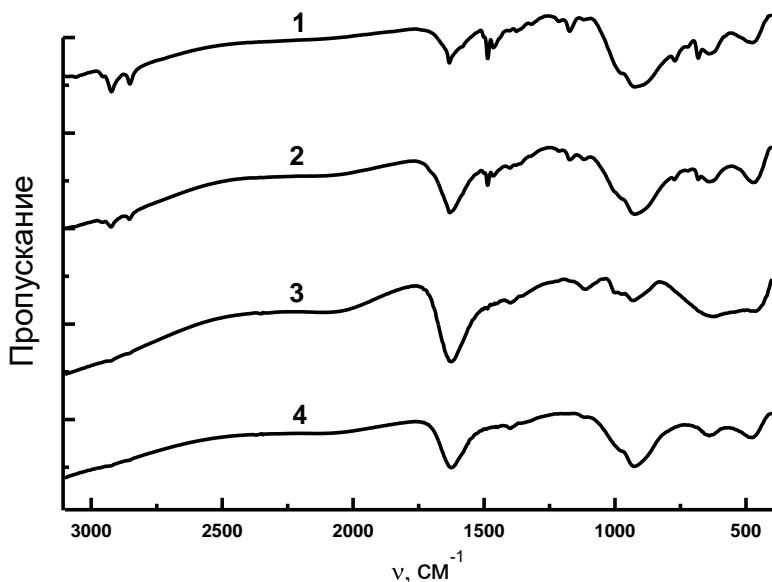


Рис. 2. ИК-спектры ZnS, полученного с использованием различных ионных жидкостей (нумерация по табл. 1)

В ИК-спектрах сульфида цинка, полученного с использованием ионных жидкостей ИЖ-1 и ИЖ-2, наблюдаются характеристические полосы поглощения алкильной цепи органического катиона ионной жидкости: 3000–2850 [$\nu(C-H_{Alk})$], 1470–1350 [$\delta(C-H_{Alk})$] cm^{-1} . Для сульфида цинка, полученного из ИЖ-3 и ИЖ-4, данные полосы поглощения отсутствуют. Таким образом, интенсивность полос поглощения ослабевает с уменьшением длины алкильной цепи в катионе ИЖ. Это может быть обусловлено двумя основными факторами: снижением склонности к адсорбции молекул ионной жидкости на поверхности наночастиц сульфида цинка с уменьшением длины алкильной цепи (снижением поверхностной активности), а также снижения интенсивности поглощения из-за меньшего количества метиленовых групп в катионе.

Для оценки фазового состава и среднего размера наночастиц сульфида цинка проведены исследования нанопорошков ZnS методом

рентгенофазового анализа (РФА) (рис. 3). Соотнесенные с пиками на рентгенограмме индексы Миллера соответствуют условию: $(h+k)$ – четное, $(k+l)$ – четное и $(h+l)$ – четное. Это позволяет установить, что ZnS имеет гранецентрированную кристаллическую решетку. Все синтезированные образцы ZnS имели кубическую решетку типа B3 (пространственная группа 216) с периодом решетки $a=0,5338\text{--}0,5401$ нм, что хорошо согласуется с результатами работы [19].

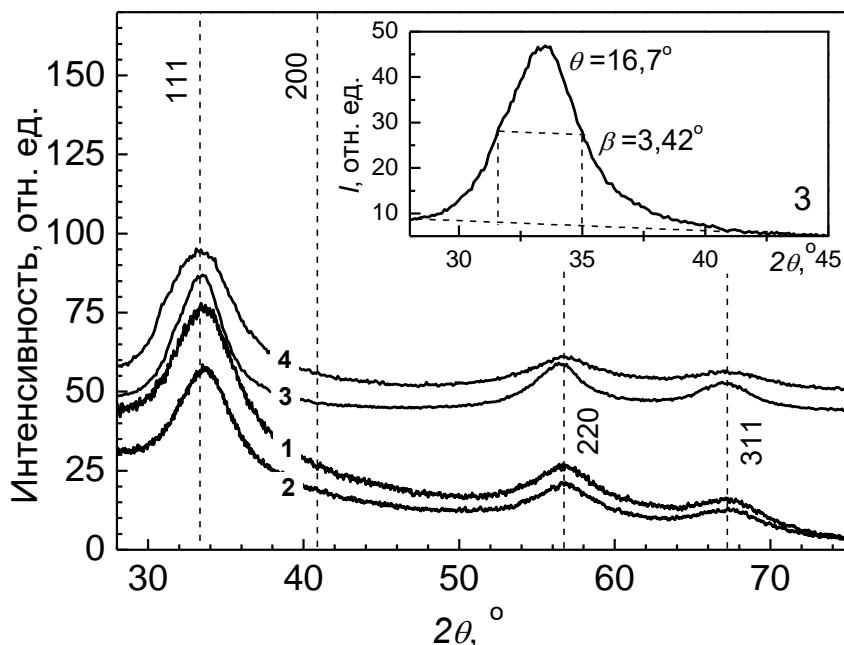


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы нанопорошков ZnS, полученных с использованием ионных жидкостей (нумерация по табл.1)

Таким образом, полученные нанопорошки сульфида цинка имели кубическую кристаллическую решетку типа сфалерит. Схожие результаты получены нами ранее при синтезе наночастиц сульфида цинка с использованием ионной жидкости 1-декилпиридиний тетрафторбората в органических растворителях [20]. На дифрактограмме пунктирными линиями обозначены положения рефлексов, соответствующих фазе ZnS (структурный тип cF8/3). Все экспериментальные спектры характеризуются очень широкими дифракционными отражениями. Размер кристаллитов d в нанопорошках сульфида цинка определялся с использованием уравнения Шеррера [21–23] по уширению дифракционных отражений (2).

$$D = \frac{\psi\lambda}{\beta \cos\left(\frac{2\theta}{2}\right)} \quad (2)$$

где ψ – коэффициент Шеррера (0,9 – для сферических частиц), β – интегральная ширина дифракционного пика – полная ширина на полувысоте (FWHM) пиков соответствующих отражений при геометрии 2θ .

Для примера, на вставке рис. 3 показана часть дифрактограммы нанопорошка ZnS, полученного из ИЖ-3 в области пика (111), который имеет наивысшую интенсивность. Вместе с экспериментальной кривой на графике обозначены параметры θ и β , которые использовались для определения размера кристаллитов. Размеры наночастиц сульфида цинка, полученные методом РФА, близки и лежат в узком интервале от 3,97 до 4,92 нм (табл. 2). Полученные методом РФА размерные характеристики хорошо коррелируются с размерами, полученными с помощью метода УФ-спектроскопии.

Таблица 2.
Данные рентгенофазового анализа нанопорошков ZnS, полученных с использованием различных ионных жидкостей.

№	Ионная жидкость	a , нм	θ , град.	β , град.	d , нм
1	ИЖ-1	0,5338	16,8	4,16	4,15
2	ИЖ-2	0,5339	16,8	3,89	4,04
3	ИЖ-3	0,5401	16,7	3,42	4,92
4	ИЖ-4	0,5396	16,6	4,22	3,97

По данным атомно-силовой (АСМ) (рис. 4) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (рис. 5) полученный сульфид цинка имеет нанокристаллическую структуру с видимым размером наночастиц 100 нм и более. Реальный размер частиц отличается от размера, полученного методами РФА и УФ-спектроскопии, поскольку при этом рассчитывается средний размер кристаллических доменов и, следовательно, не учитываются поликристаллические частицы и агрегаты.

Кроме этого, методы АСМ и электронной микроскопии не обладают достаточной разрешающей способностью. Тем не менее по данным АСМ (рис. 4) можно заключить, что при использовании ИЖ-1 размер образующихся агрегатов составляет порядка 100–150 нм. Напротив, при использовании ИЖ-4 агрегаты имеют размер более 200 нм.

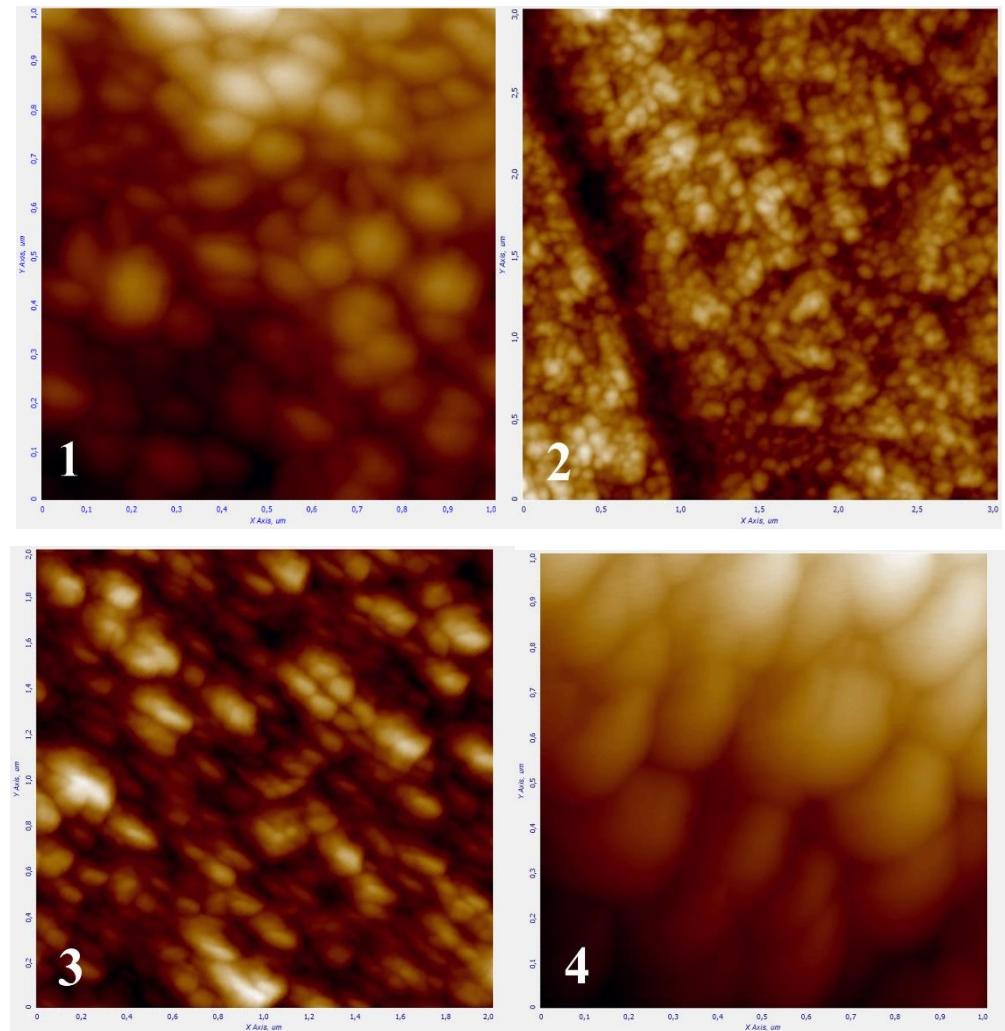


Рис. 4. АСМ-изображенияnanoструктуры ZnS, полученного с использованием 1-(ИЖ-1); 2-(ИЖ-2), 3-(ИЖ-3), 4-(ИЖ-4)

Схожие результаты наблюдаются и при использовании метода сканирующей электронной микроскопии. Данные СЭМ хорошо иллюстрируют скопление частиц и образование поликристаллитов.

Результаты атомно-силовой микроскопии в совокупности с данными электронной микроскопии свидетельствуют о сильной агрегации наночастиц сульфида цинка, при выделении его из золя и пробоподготовке.

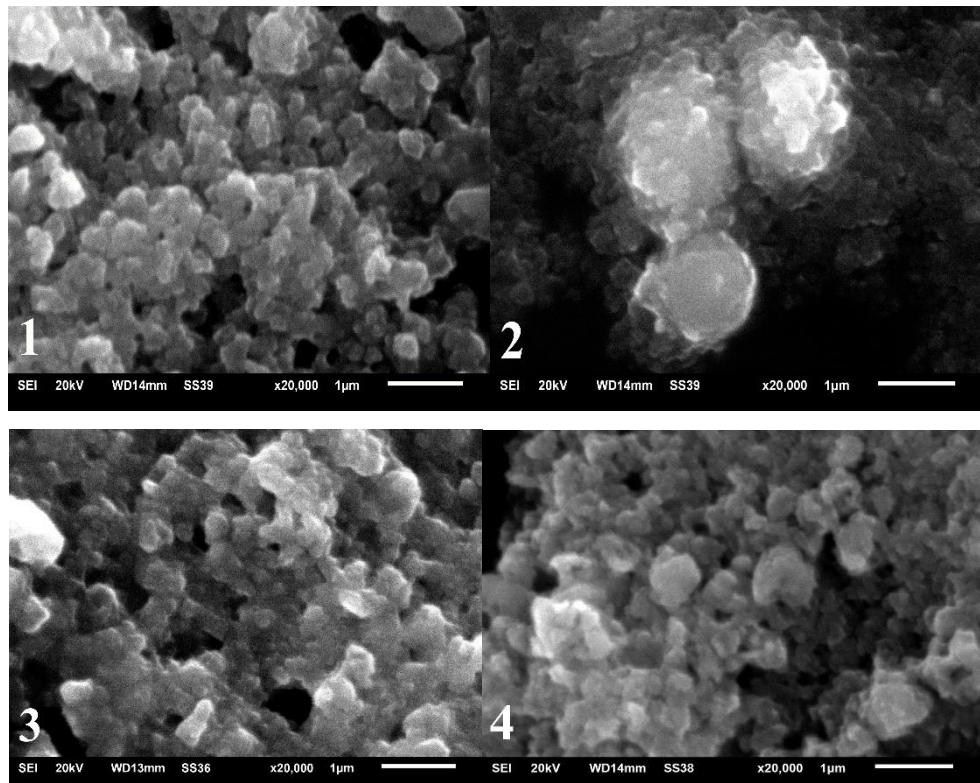


Рис. 5. РЭМ-изображенияnanoструктуры ZnS, полученного с использованием 1-(ИЖ-1); 2-(ИЖ-2), 3-(ИЖ-3), 4-(ИЖ-4)

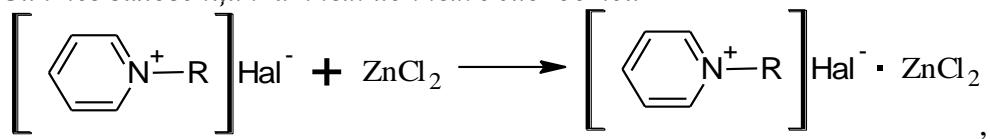
Таким образом, проведен синтез наночастиц сульфида цинка из галогенцинкатных 1-алкилпиридиниевых ионных жидкостей. Показано, что размеры частиц в золях составляют от 2 до 5 нм. Методом ИК-спектроскопии подтверждено наличие адсорбционного слоя на поверхности наночастиц. Установлено, что средний размер наночастиц в золе слабо зависит от структуры исследуемых ионных жидкостей в растворе. Сопоставляя размеры наночастиц, полученные разными методами, можно заключить, что методы растровой электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии дают завышенные результаты (>100 нм) по сравнению с методом рентгеновской дифракции и УФ-спектроскопии, что может быть обусловлено агрегацией наночастиц при их выделении из золя и последующей пробоподготовки.

Экспериментальная часть

ИК-спектры ионных жидкостей, а также ИК-спектры сульфида цинка снимали на Фурье ИК-спектрометре ALPHA. Сульфид цинка перед записью ИК-спектров был выделен из золя и 3 раза промыт водой. Высушен в вакууме в течение 24 ч. Спектры золей сульфида цинка в УФ-области записывали на спектрофотометре СФ-56 (Ломо) в диапазоне 200–400 нм при 25°C. Толщина оптического слоя 1 см. Элементный анализ ионных жидкостей проводили на анализаторе Perkin Elmer CHNS/O PE 2400-II. Рельеф поверхности нанокристаллического сульфида цинка, выделенного из золей, получен на атомно-силовом микроскопе Solver Next на подложке из стекла. Микроструктуру образцов исследовали на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM 6610LV в режимах вторичных электронов (SEI). Рентгенофазовый анализ порошкообразных образцов осуществляли на дифрактометре ДРОН-7.0. Используемый дифрактометр модифицирован системой быстрой регистрации на основе линейного стрипового позиционно-чувствительного детектора Mythen 1K (производитель – фирма Dectris Ltd., Швейцария). В качестве источника рентгеновского излучения использовалась рентгеновская трубка с СоКа-излучением ($\lambda=0,1789007$ нм). Параметры элементарной ячейки определялись по отражениям в области углов $2\theta=15-105^{\circ}$. Диагностика состава проводилась методом сопоставления экспериментального и эталонных спектров.

Для синтеза галогенцинкатных ИЖ использовали $ZnCl_2$ (ЧДА), Na_2S (ЧДА) и галогениды 1-алкилпиридиния, которые были получены и очищены по методике, описанной ранее [24].

Синтез галогенцинкатных ионных жидкостей



где R: C_4H_9 , C_8H_{17} , $C_{10}H_{21}$, $C_{12}H_{25}$; Hal: Cl, Br.

В плоскодонной колбе на 50 мл растворяли 0,05 моль соответствующего галогенида 1-алкилпиридиния в 10 мл дихлорметана. В полученный раствор вносили эквимолярное количество безводного хлорида цинка. Реакцию проводили при комнатной температуре при постоянном перемешивании в течение 24 ч. Затем растворитель упаривали на роторном испарителе, а остаток дважды промывали эфиром. Продукт сушили в вакууме в течение 24 ч. Все ионные жидкости охарактеризованы по данным элементного анализа и ИК-спектроскопии.

(ИЖ-1). ИК спектр, ν , см⁻¹: 3126, 3086, 3060 (C—H_{Ar}), 2923, 2853 (C—H_{Alk}), 1485, 1465 (C—C_{Ar}), 1420, 1377 [δ (C—H_{Alk})]. Найдено, %: C 43,9; H 6,7; N 2,9. C₁₇H₃₀BrCl₂NZn. Вычислено, %: C 44,0; H 6,5; N 3,0.

(ИЖ-2). ИК спектр, ν , см⁻¹: 3127, 3059, (C—H_{Ar}), 2925, 2855 (C—H_{Alk}), 1583, 1486 (C—C_{Ar}), 1411, 1378 [δ (C—H_{Alk})]. Найдено, %: C 45,9; H 6,8; N 3,5. C₁₅H₂₆Cl₃NZn. Вычислено, %: C 46,0; H 6,6; N 3,6.

(ИЖ-3). ИК спектр, ν , см⁻¹: 3126, 3059 (C—H_{Ar}), 2927, 2857 (C—H_{Alk}), 1582, 1499 (C—C_{Ar}), 1377 [δ (C—H_{Alk})]. Найдено, %: C 38,1; H 5,5; N 3,4. C₁₃H₂₂BrCl₂NZn. Вычислено, %: C 38,2; H 5,4; N 3,4.

(ИЖ-4). ИК спектр, ν , см⁻¹: 3128, 3054 (C—H_{Ar}), 2958, 2934, 2874 (C—H_{Alk}), 1583, 1466 (C—C_{Ar}), 1405, 1381 [δ (C—H_{Alk})]. Найдено, %: C 30,6; H 4,1; N 3,9. C₉H₁₄BrCl₂NZn. Вычислено, %: C 30,7; H 4,0; N 4,0.

Список литературы:

1. Таланов В.М. Основы нанохимии и нанотехнологии / В.М. Таланов, Г.П. Ерейская // Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ). – 2014. – 524 с.
2. Ремпель А.А. Квантовые точки для техники и медицины / А.А. Ремпель // Вестник Уральского отделения РАН. – 2010. – №2. – С. 45-51.
3. Carey G.H. [et al.] Colloidal Quantum Dot Solar Cells / G.H. Carey [et al.] // Chemical Reviews. – 2015. – №115. – P. 12732-12764
4. Rafailov E.U. Mode-locked quantum-dot lasers / E.U. Rafailov, M.A. Cataluna, W. Sibbet // Nature Photonics. – 2007. – №1. – P. 395-401
5. Chuang P.-H. Emission-Tunable CuInS₂/ZnS Quantum Dots: Structure, Optical Properties, and Application in White Light-Emitting Diodes with High Color Rendering Index / P.-H. Chuang, C.C Lin., R.-S. Liu // ACS Appl. Mater. Interfaces. – 2014. – №6. – P. 15379-15388
6. Абдуллин Х.А. [и др.] Изучение нанокристаллического сульфида цинка, полученного гидротермальным методом / Х.А. Абдуллин [и др.] // Вестник. Серия физическая химия (ВКФ). – 2018. – С. 69-75
7. Евстропьев С.К. Жидкостные методы получения оптических наноматериалов / С.К. Евстропьев, Н. В. Никоноров // СПб.: Университет ИТМО. – 2018. – 84 с.
8. Goharshadi E.K. [et al.] Sonochemical synthesis and measurement of optical properties of zinc sulfide quantum dots / E.K. Goharshadi [et al.] // Chemical Engineering Journal. – 2012. – №209. – P.113-117
9. Ремпель А.А. Структура мицеллы наночастиц сульфида кадмия в водных растворах / А.А. Ремпель, Н.С. Кожевникова, С.В. Ремпель // Известия АН. Серия химическая. – 2013. – №2. – С. 400-404
10. Rajabi H.R. Zinc sulfide quantum dots as powerful and efficient nanophotocatalysts for the removal of industrial pollutant / H.R. Rajabi, F. Shahrezaei, M. Farsi // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2016. – №27(9). – P. 9297-9305

11. Melendres-Sánchez J. C. [et al.] Zinc sulfide quantum dots coated with PVP: applications on commercial solar cells / J. C. Melendres-Sánchez [et al.] // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2021. – №32(2). – P. 1457-1465
12. Чабакова А.К. Ионные жидкости в органическом синтезе. / А.К. Чабакова, Е.В. Щепетова, Н.М Абдурахманова // Успехи современного естествознания. – 2018. – №12. – С. 216-226
13. Arora K. Facile and Greener One Pot Synthesis of Zinc Quantum Dots Employing Zinc based Ionic Liquids and their Photocatalytic Activity / K. Arora, P. Shikha, T.S. Kang // New Journal of Chemistry. – 2017. – №41(15). – 7407-7416
14. Blinov A.V. [et al.] Synthesis of Selenium Nanoparticles Stabilized by Quaternary Ammonium Compounds / A.V. Blinov [et al.] // Russian Journal of General Chemistry. – 2022. – №3. – P. 1-6
15. Biswas K. Use of Ionic Liquids in the Synthesis of Nanocrystals and Nanorods of Semiconducting Metal Chalcogenides / K. Biswas, C.N.R. Rao // Chemistry: A European Journal. – 2007. – №13. – P. 6123-6129
16. Sekha M.C. [et al.] CdTe Quantum Dots in Ionic Liquid: Stability and Hole Scavenging in the Presence of a Sulfide Salt / M.C Sekha [et al.] // J. Phys. Chem. C. – 2014. – №118. – P. 18481-18487
17. Wang Q.-T. [et al.] Stable Blue- and Green-Emitting Zinc Oxide from Ionic Liquid Crystal Precursors / Q.-T. Wang [et al.] // ChemPhysChem. – 2009. – №10. – P. 3201-3203
18. Leu M. Synthesis of luminescent semiconductor nanoparticles in ionic liquids –the importance of the ionic liquid in the formation of quantum dots / M. Leu, P. Campbell, A.-V. Mudring // Green Chemistry Letters and Reviews. – 2021. – №14. – P. 128-136
19. Chen Y. [et al.] Synthesis and Characterization of ZnS, CdS, and Composition-Tunable $Zn_xCd_{1-x}S$ Alloyed Nanocrystals via a Mix-Solvothermal Route / Y. Chen [et al.] // J. Phys. Chem. C – 2009. – Vol. 113, № 6. – P. 2263-2266
20. Журавлев О.Е Синтез наночастиц сульфида цинка в среде ионной жидкости – N-декипиридиний тетрафторбората / О.Е. Журавлев, И.А. Пресняков, Л.И. Ворончихина // ЖПХ. – 2015. – Т.88, № 6. – С. 848-854
21. West A.R. Solid State Chemistry and its Applications / A.R. West // New York: John Wiley and Sons. – 2014. – 592 p.
22. Peddis D. [et al.] Interparticle Interactions and Magnetic Anisotropy in Cobalt Ferrite Nanoparticles: Influence of Molecular Coating / D. Peddis [et al.] // Chem. Mater. – 2012. – Vol. 24, № 6. – P. 1062-1071
23. Muscas G. [et al.] Tuning the Size and Shape of Oxide Nanoparticles by Controlling Oxygen Content in the Reaction Environment: Morphological Analysis by Aspect Maps / G. Muscas [et al.] // Chem. Mater. – 2015. – Vol. 27, № 6. – P. 1982-1990

24. Журавлев О.Е. Влияние структуры нуклеофила и субстрата на кватернизацию гетероциклических аминов / О.Е. Журавлев, Н.В. Веролайнен, Л.И. Ворончихина // ЖОХ. – 2010. – Т. 80, № 5. – С. 854-857

Об авторах:

АРЕФЬЕВ Александр Алексеевич – студент 1 курса аспирантуры, химико-технологический факультет Тверского государственного университета (170002, г. Тверь, Садовый пер., д. 35); e-mail: superzuckermann2000@gmail.com

КАФТАНОВ Арсений Дмитриевич – аспирант 4 года обучения кафедры органической химии химико-технологического факультета Тверского государственного университета (170002, г. Тверь, Садовый пер., д. 35); e-mail: kaftanov98@mail.ru

КАРПЕНКОВ Алексей Юрьевич – доцент, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой прикладной физики (170002, г. Тверь, Садовый пер., д. 35); e-mail: karpenkov_alex@mail.ru

ЖУРАВЛЕВ Олег Евгеньевич – доцент, кандидат химических наук, доцент кафедры органической химии химико-технологического факультета Тверского государственного университета (170002, г. Тверь, Садовый пер., д. 35); e-mail: Zhuravlev.OE@tversu.ru

**PRODUCTION OF ZINC SULFIDE QUANTUM DOTS USING
HALOGENZINCATE 1-ALKYLPYRIDINIUM IONIC LIQUIDS**

A.A. Arefev, A.D. Kaftanov, A.Yu. Karpenkov, O.E. Zhuravlev

Tver State University, Tver

Zinc sulfide nanoparticles, quantum dots, have been synthesized from halogenzincate 1-alkylpyridinium ionic liquids with different alkyl chain lengths in the cation. The average sizes of zinc sulfide nanoparticles were determined by UV-spectroscopy, X-ray diffraction, atomic force microscopy, and scanning electron microscopy. The effect of the structure of halogenzincate 1-alkylpyridinium ionic liquids on the size of zinc sulfide nanoparticles has been studied.

Keywords: *quantum dots, halogenzincate ionic liquids, synthesis, zinc sulfide nanoparticles.*

Дата поступления в редакцию: 24.10.2025.

Дата принятия в печать: 30.10.2025.