

ГАЛОГЕНЦИНКАТНЫЕ ПИРИДИНИЕВЫЕ ИОННЫЕ ЖИДКОСТИ КАК ПРЕКУРСОРЫ ДЛЯ СИНТЕЗА НАНОЧАСТИЦ СУЛЬФИДА ЦИНКА

© 2025 г. О. Е. Журавлев^{1,*}, А. А. Арефьев¹, А. Ю. Карпенков¹

¹ Тверской государственный университет, Тверь, 170002 Россия

*e-mail: pifchem@mail.ru

Поступило в редакцию 21 января 2025 г.

После доработки 18 февраля 2025 г.

Принято к печати 20 февраля 2025 г.

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, наночастицы сульфида цинка

DOI: 10.31857/S0044460X25010055, **EDN:** AHLYDW

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые наночастицы с люминесцентными свойствами, размеры которых, как правило, менее 50 нм, получили название квантовые точки. Физико-химические свойства квантовых точек можно легко настроить путем точного контроля их размеров с использованием различных методов синтеза [1–3]. Квантовые точки признаны перспективными объектами для применения в различных областях, таких как солнечные элементы [4], лазерные устройства [5], светоизлучающие устройства (светодиоды) [6], биосенсоры [7]. Известно достаточно много методов получения наночастиц полупроводников. Несмотря на это, появляются новые экономичные и эффективные синтетические методы получения квантовых точек, необходимые для их более широкого использования. Существует множество квантовых точек, таких как ZnS, CdS, CdSe, ZnSe, CdTe, ZnO, ZnTe и др. [8]. Среди них наиболее перспективными квантовыми точками являются наночастицы сульфида цинка (ZnS), который относится к полупроводниковым материалам II–VI групп благодаря

своим уникальным физико-химическим свойствам, таким как химическая стабильность и экологичность, по сравнению с другими полупроводниками II–VI групп [9]. В настоящее время известны различные методы получения квантовых точек ZnS, например, такие как гидротермальный, соосаждение, микроволновый, ультразвуковой [10, 11].

В последние годы ионные жидкости стали экологически чистой альтернативой летучим органическим растворителям благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам [12]. Их также называют «дизайнерскими растворителями» или «дизайнерскими системами», потому что их свойства можно изменить путем подбора катиона и аниона в их составе [13]. Одним из важных свойств многих ионных жидкостей является то, что для них характерна амфи菲尔ность, что относит их к категории ионных поверхностно-активных веществ [14]. Ионные жидкости, которые проявляют поверхностно-активные свойства, обычно называют поверхностно-активными ионными жидкостями. Свойства таких ионных жидкостей схожи с поверхностно-активными веще-

ствами (ПАВ), а в случае поверхностной активности и склонности к самоорганизации зачастую более выражены, чем в классических ионных ПАВ [15]. Вследствие ионной природы, делокализации заряда на ионах, способности к образованию водородных связей, а также варьируемой поляризумости ионные жидкости могут быть использованы для получения гелей, пленок и различных полимерных материалов с заданными свойствами [16, 17]. Ионные жидкости с катионом 1,3-диалкилимидазолия были использованы в качестве растворителей и/или стабилизаторов для получения различных наночастиц, включая квантовые точки: телурида кадмия [18], оксида цинка [19] и сульфидов кадмия и цинка [20]. В частности, авторы работы [21] синтезировали наночастицы ZnS, используя смесь ионной жидкости $[\text{bmim}][\text{BF}_4]$ и воды при ультразвуковом воздействии, и установили, что размер частиц уменьшается с 19 до 8 нм по мере увеличения соотношения ионных жидкостей к воде. В подавляющем большинстве случаев квантовые точки ZnS получают с использованием лишь 1,3-диалкилимидазолиевых ионных жидкостей в качестве растворителей или темплат [21–24]. В качестве прекурсоров могут быть использованы галогенцинкатные 1,3-диалкилимидазолиевые ионные жидкости, что отражается в работах по получению на их основе наночастиц оксида [19] и сульфида цинка [25]. В литературе отсутствуют работы по изучению влияния структуры галогенцинкатных пиридиниевых ионных жидкостей на размеры наночастиц сульфида цинка.

Цель работы – синтез квантовых точек сульфида цинка с использованием цинксодержащих пиридиниевых ионных жидкостей и установление влияния

структур ионной жидкости на размеры полученных наночастиц.

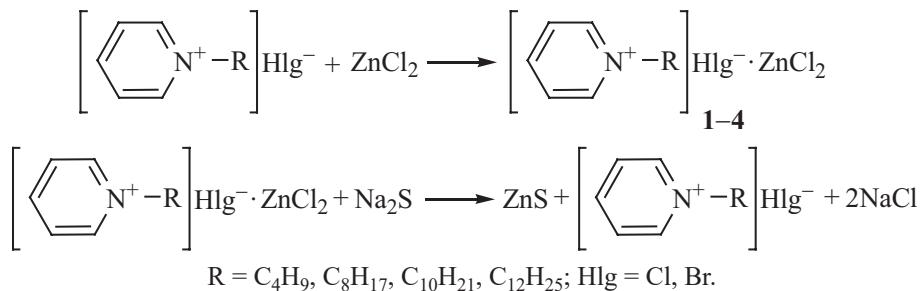
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

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. Синтез наночастиц сульфида цинка на основе 1-алкилпиридиниевых ионных жидкостей представлен на схеме 1.

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 пиридинина 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 сульфида цинка. Кроме этого, использование пиридиниевых ионных жидкостей более целесообразно, чем 1,3-диалкилимидазолиевых, с экономической точки зрения (стоимость производных имидазола выше, чем пиридинина).

Для оценки среднего размера наночастиц сульфида цинка в золях по величине сдвига края фундаментального поглощения спектральным методом [18] были записаны спектры поглощения в УФ области золей сульфида цинка. Графически находилась длина

Схема 1.



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 [19, 20]:

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

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.

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 (2 и 3 соответственно). Использование в качестве прекурсоров ионных жидкостей с катионами 1-бутил- (4) и 1-додецилпиридиния (1) приводит к

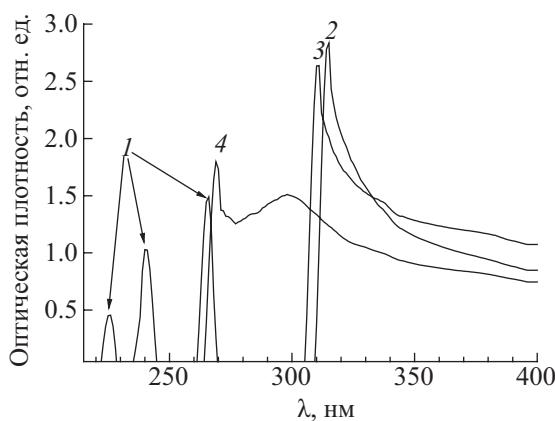


Рис. 1. Спектры УФ поглощения золей сульфида цинка, полученных из хлорцинкатных ионных жидкостей 1–4 (1–4).

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 табл. 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 1. Не прослеживается четкой зависимости между размером катиона в структуре ионных жидкостей и размером наночастиц сульфида цинка в золях. Наибольшие размеры наночастиц в золе (5.0 нм) наблюдаются при использовании ионной жидкости 2.

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 агрегированию. Для подтверждения данной гипотезы

Таблица 1. Средние размеры наночастиц сульфида цинка по данным УФ спектроскопии.

Ионная жидкость	λ , нм	$d \pm 0.1$, нм
$\left[\text{C}_6\text{H}_5\text{N}^+ - \text{C}_{12}\text{H}_{25} \right] \text{Br}^- \cdot \text{ZnCl}_2$ 1	225	2.0
	241	2.2
	266	2.7
$\left[\text{C}_6\text{H}_5\text{N}^+ - \text{C}_{10}\text{H}_{21} \right] \text{Cl}^- \cdot \text{ZnCl}_2$ 2	315	5.0
$\left[\text{C}_6\text{H}_5\text{N}^+ - \text{C}_8\text{H}_{17} \right] \text{Br}^- \cdot \text{ZnCl}_2$ 3	269	2.8
	298	3.8
$\left[\text{C}_6\text{H}_5\text{N}^+ - \text{C}_4\text{H}_9 \right] \text{Br}^- \cdot \text{ZnCl}_2$ 4	311	4.6

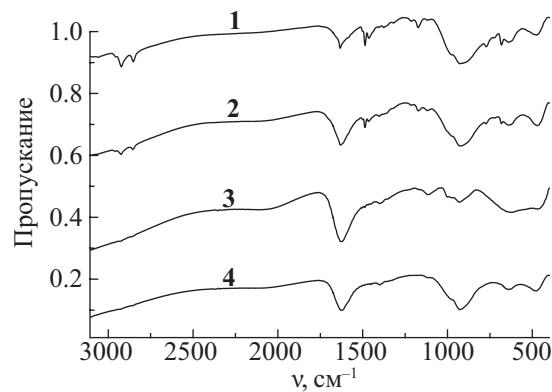


Рис. 2. ИК спектры ZnS, полученного с использованием различных ионных жидкостей 1–4.

использован метод ИК спектроскопии, и записаны спектры сульфида цинка, полученного из ионных жидкостей (рис. 2).

В ИК спектрах сульфида цинка, полученного с использованием ионных жидкостей 1 и 2, наблюдаются характеристические полосы поглощения алкильной цепи органического катиона ионной жидкости: 3000–2850 [$\nu(C-H_{Alk})$], 1470–1350 cm^{-1} [$\delta(C-H_{Alk})$]. Для сульфида цинка, полученного из ионных жидкостей 3 и 4, данные полосы поглощения отсутствуют. Таким образом, интенсивность полос поглощения ослабевает с уменьшением длины алкильной цепи в катионе ионной жидкости. 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 снижением интенсивности поглощения из-за меньшего количества метиленовых групп в катионе.

Для оценки фазового состава и среднего размера наночастиц сульфида цинка проведены исследования нанопорошков 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 В3 (пространственная группа 216) с периодом решетки

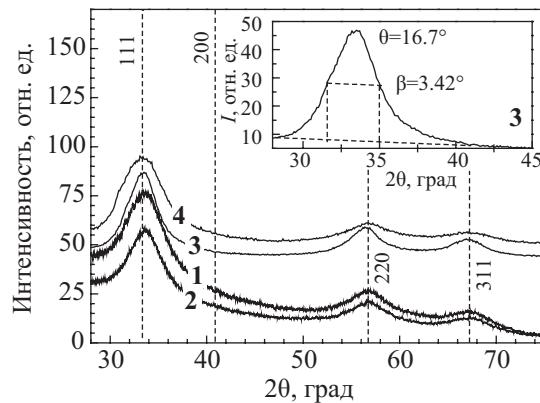


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы нанопорошков ZnS, полученных с использованием ионных жидкостей 1–4.

$a = 0.5338\text{--}0.5401$ нм, что хорошо согласуется с результатами работы [26]. 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-декилпиридиния тетрафторбората в органических растворителях [27]. 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 [28–30] по уширению дифракционных отражений (2).

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

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 ионной жидкости 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 синтезированных наночастиц сульфида цинка, рассчитанные

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

Ионная жидкость	a , нм	θ , град	β , град	d , нм
1	0.5338	16.8	4.16	4.15
2	0.5339	16.8	3.89	4.04
3	0.5401	16.7	3.42	4.92
4	0.5396	16.6	4.22	3.97

из данных РФА, очень близки между собой 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.

По данным атомно-силовой (АСМ) (рис. 4) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (рис. 5) полученный сульфид цинка имеет нано-

кристаллическую структуру с видимым размером наночастиц 100 нм и более. Реальный размер частиц отличается от размера, рассчитанного на основе рентгеноструктурного анализа 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 ионной жидкости 1 размер образующихся агрегатов составляет порядка 100–150 нм. Напротив, при использовании ионной жидкости 4 агрегаты имеют размер более 200 нм. Вероятнее всего, это связано с большей склонностью к адсорбции ионной жидкости 1 на поверхности наночастиц сульфида цинка по сравнению с остальными изученными нами ионными жидкостями. Такой эффект может быть связан с наибольшей длиной алкильной цепи

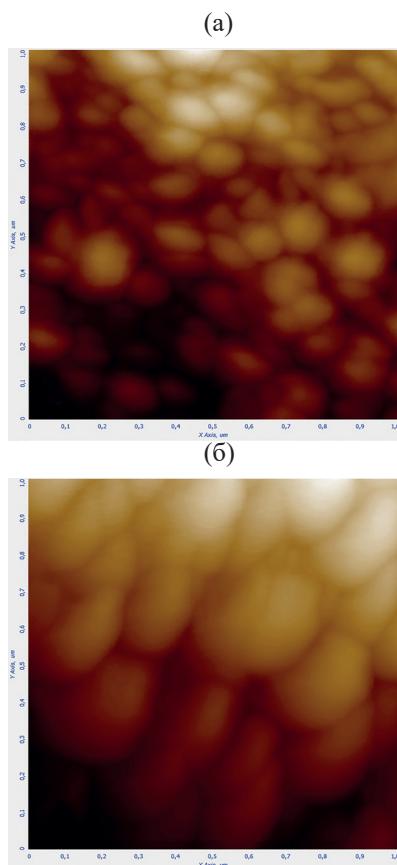


Рис. 4. АСМ-изображенияnanoструктуры ZnS, полученного с использованием ионных жидкостей 1 (а) и 4 (б).

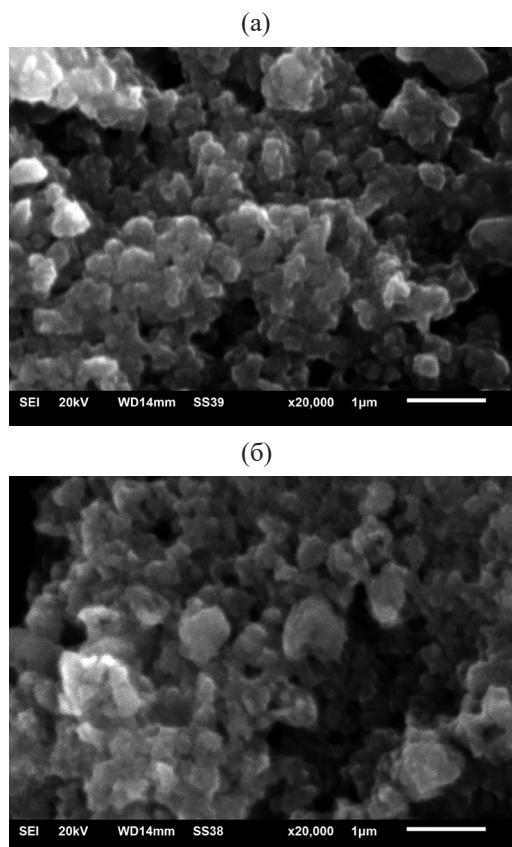


Рис. 5. РЭМ-изображения nanoструктуры ZnS, полученного с использованием ионных жидкостей 1 (а) и 4 (б).

в катионе ионной жидкости 1, что приводит к усилению поверхностно-активных свойств, и, как следствие, к снижению агрегации наночастиц. 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. Авторами работы [25] в качестве прекурсоров для синтеза квантовых точек ZnS были использованы 1,3-диалкилимидалиевые галогенцинкатные ионные жидкости. Размеры полученных наночастиц ZnS составляли от 1.5 до 5.0 нм в зависимости от длины алкильного заместителя в катионе. Размеры наночастиц ZnS полученные нами по той же методике с использованием 1-алкилпиридиниевых ионных жидкостей имеют очень близкие значения.

ВЫВОДЫ

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 снимали на ИК Фурье-спектрометре ALPHA. Сульфид цинка перед записью ИК спектров был выделен из золя центрифугированием и 3 раза промыт водой, затем высушен в вакууме в течение 24 ч. Спектры золя сульфида цинка в УФ области записывали на спектрофотометре СФ-56 (Ломо) в диапазоне 200–400 нм, толщина оптического слоя – 1 см. Элементный анализ проводили на анализаторе

PerkinElmer 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 (СЭМ) 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 (Dectris Ltd., Швейцария). Данная система увеличивает быстродействие прибора на два порядка при сохранении углового разрешения. Высокое энергетическое разрешение детектора, подавляющее вторичный рентгенфлуоресцентный фон, позволяет получать значительное улучшение отношения сигнал/шум, т. е. более высокую контрастность спектра и, как следствие, более низкий предел обнаружения фазы в образце. В качестве источника рентгеновского излучения использовалась рентгеновская трубка с CoK_α -излучением ($\lambda = 0.1789007$ нм). Параметры элементарной ячейки определялись по отражениям в области углов $2\theta = 15\text{--}105^\circ$. Диагностику состава проводили методом сопоставления экспериментального и эталонных спектров.

Для синтеза галогенцинкатных ионных жидкостей использовали ZnCl_2 (ЧДА), Na_2S (ЧДА) и галогениды 1-алкилпиридиния, которые были получены и очищены по методике, описанной ранее [31]. Наночастицы сульфида цинка получены по методике, описанной в работе [25].

Синтез галогенцинкатных ионных жидкостей.

К раствору 0.05 моль соответствующего галогенида 1-алкилпиридиния в 10 мл дихлорметана прибавляли эквимолярное количество хлорида цинка. Реакцию проводили при комнатной температуре с постоянным перемешиванием в течение 24 ч, затем растворитель упаривали на роторном испарителе. Остаток дважды промывали диэтиловым эфиром, затем сушили в вакууме в течение 24 ч.

Ионная жидкость 1. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 3126, 3086, 3060 ($\text{C}-\text{H}_{\text{Ar}}$), 2923, 2853 ($\text{C}-\text{H}_{\text{Alk}}$), 1485, 1465 ($\text{C}-\text{C}_{\text{Ar}}$), 1420, 1377 [$\delta(\text{C}-\text{H}_{\text{Alk}})$]. Найдено, %: C 43.9; H 6.7; N 2.9. $\text{C}_{17}\text{H}_{30}\text{BrCl}_2\text{N}\text{Zn}$. Вычислено, %: C 44.0; H 6.5; N 3.0.

Ионная жидкость 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.

Ионная жидкость 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.

Ионная жидкость 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

О. Е. Журавлев, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6187-4287>

А. Ю. Карпенков, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8174-0964>

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность Е. М. Семеновой (Тверской государственный университет) за результаты атомно-силовой микроскопии. Исследования микроструктуры образцов были выполнены в научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии Центра коллективного пользования научной аппаратурой и оборудованием Тверского государственного университета.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Weng J., Ren J.* // *Curr. Med. Chem.* 2006. Vol. 13. P. 897. doi 10.2174/092986706776361076
2. *Das A., Snee P.T.* // *ChemPhysChem.* 2016. Vol. 17. P. 598. doi 10.1002/cphc.201500837
3. *Nune S.K., Gunda P., Thallapally P.K., Lin Y.-Y., Forrest M.L., Berkland C.J.* // *Expert Opin. Drug Deliv.* 2009. Vol. 6. P. 1175. doi 10.1517/17425240903229031
4. *Carey G.H., Abdelhady A.L., Ning Z., Thon S.M., Bakr O.M., Sargent E.H.* // *Chem. Rev.* 2015. Vol. 115. P. 12732. doi 10.1021/acs.chemrev.5b00063
5. *Rafailov E.U., Cataluna M.A., Sibbet W.* // *Nat. Photon.* 2007. Vol. 1. P. 395. doi 10.1038/nphoton.2007.120
6. *Chuang P.-H., Lin C.C., Liu R.-S.* // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2014. Vol. 6. P. 15379. doi 10.1021/am503889z
7. *Ji X., Zheng J., Xu J., Rastogi V.K., Cheng T.-C., De-Frank J.J., Leblanc R.M.* // *J. Phys. Chem. (B).* 2005. Vol. 109. P. 3793. doi 10.1021/jp044928f
8. *Frecker T., Bailey D., Arzeta-Ferrer X., McBride J., Rosenthal S.J.* // *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2016. Vol. 5. P. R3019. doi 10.1149/2.0031601jss
9. *Peng W.Q., Qu S.C., Cong G.W., Zhang X.Q., Wang Z.G.* // *J. Cryst. Growth.* 2005. Vol. 282. P. 179. doi 10.1016/j.jcrysGro.2005.05.005
10. *Ming F., Hong J., Xu X., Wang Z.* // *RSC Adv.* 2016. Vol. 6. P. 31551. doi 10.1039/C6RA02840C
11. *Tiwary C.S., Kumbhakar P., Mitra A.K., Chattopadhyay K.* // *J. Lumin.* 2009. Vol. 129. P. 1366. doi 10.1016/j.jlumin.2009.07.004
12. *Wasserscheid P., Welton T.* *Ionic Liquid in Synthesis.* Wiley: New York, 2003. doi 10.1002/9783527621194
13. *Ma Z., Yu J., Dai S.* // *Adv. Mater.* 2010. Vol. 22. P. 261. doi 10.1002/adma.200900603
14. *Dolan A., Atkin R., Warr G.G.* // *Chem. Sci.* 2015. Vol. 6. P. 6189. doi 10.1039/C5SC01202C
15. *Rao K.S., Bharmoria P., Trivedi T.J., Kumar A.* *Self-assembly of surface-active ionic liquids in aqueous medium, in ionic liquid-based surfactant science: Formulation, Characterization, and Applications /* Eds B.K. Paul, S.P. Moulik. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2015.
16. *Ueki T., Watanabe M.* // *Macromolecules.* 2008. Vol. 41. P. 3739. doi 10.1021/ma800171k
17. *Schleicher J., Scurto A.M.* // *Green Chem.* 2009. Vol. 11. P. 694. doi 10.1039/B808364A
18. *Sekhar M.C., Santhosh K., Kumar J.P., Mondal N., Soumya S., Samanta A.* // *J. Phys. Chem. (C).* 2014. Vol. 118. P. 18481. doi 10.1021/jp507271t
19. *Wang Q.-T., Wang X.-B., Lou W.-J., Hao J.-C.* // *ChemPhysChem.* 2009. Vol. 10. P. 3201. doi 10.1002/cphc.200900566
20. *Leua M., Campbella P., Mudring A.-V.* // *Green Chem. Let. Rev.* 2021. Vol. 14. P. 128. doi 10.1080/17518253.2021.1875057
21. *Wu Y., Hao X., Yang J., Tian F., Jiang M.* // *Mater. Lett.* 2006. Vol. 60. P. 2764. doi 10.1016/j.matlet.2006.01.106
22. *Jiang Y., Zhu Y.-J.* // *Chem. Lett.* 2004. Vol. 33. P. 1390. doi 10.1246/cl.2004.1390
23. *Goharshadi E.K., Sajjadi S.H., Mehrkhah R., Nancarrow P.* // *Chem. Eng. J.*, 2012. Vol. 209. P. 113. doi 10.1016/j.cej.2012.07.131
24. *Goharshadi E.K., Mehrkhah R., Nancarrow P.* // *Mater. Sci. Semicond. Process.* 2013. Vol. 16. P. 356. doi 10.1016/j.mssp.2012.09.012

25. *Shikha K., Kang P., Singh T.* // *New J. Chem.* 2017. Vol. 41. P. 7407. doi 10.1039/C7NJ01373F
26. *Chen Y., Zhang X., Jia C., Su Y., Li Q.* // *J. Phys. Chem. (C)*. 2009. Vol. 113. N 6. P. 2263. doi 10.1021/jp8091122
27. *Журавлев О.Е., Пресняков И.А., Ворончихина Л.И.* // *ЖПХ*. 2015. Т. 88. № 6. С. 848; *Zhuravlev O.E., Presnyakov I.A., Voronchikhina L.I.* // *Russ. J. Appl. Chem.* 2015. Vol. 88. N 6. P. 914. doi 10.1134/S1070427215060018
28. *West A.R. Solid State Chemistry and its Applications.* New York: John Wiley and Sons, 2014. 592 p.
29. *Peddis D., Orrù F., Ardu A., Cannas C., Musinu A., Piccaluga G.* // *Chem. Mater.* 2012. Vol. 24. N 6. P. 1062. doi 10.1021/cm203280y
30. *Muscas G., Singh G., Glomm W.R., Mathieu R., Kumar P.A., Concas G., Agostinelli E., Peddis D.* // *Chem. Mater.* 2015. Vol. 27. N 6. P. 1982. doi 10.1021/cm5038815
31. *Журавлев О.Е., Веролайнен Н.В., Ворончихина Л.И.* // *ЖХО*. 2010. Т. 80. № 5. С. 854; *Zhuravlev O.E., Verolainen, N.V., Voronchikhina, L.I.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2010. Vol. 80. N 5. P. 1025. doi 10.1134/S1070363210050294

Halogenzincate Pyridinium Ionic Liquids as Precursors for the Synthesis of Zinc Sulfide Nanoparticles

O. E. Zhuravlev^{1,*}, A. A. Arefev¹, and A. Yu. Karpenkov¹

¹ *Tver State University, Tver, 170002 Russia*

**e-mail: pifchem@mail.ru*

Received January 21, 2025; revised February 18, 2025; accepted February 20, 2025

Zinc sulfide nanoparticles, quantum dots, were 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 was studied.

Keywords: quantum dots, halogenzincate ionic liquids, zinc sulfide nanoparticles