

НАНОМАТЕРИАЛЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО
И КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 544.77.032.1:535.37

УЛУЧШЕНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdSe, CdSe/CdS
ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРНО-АКТИВНЫХ СРЕД

© 2022 г. У. А. Степанова^{1,*}, Х. Аль-Майяхи¹, К. Т. Хакимов¹,
А. Г. Мурадова¹, В. Б. Зайцев², Е. Н. Тельминов³

¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

*E-mail: uljana_stepanova@mail.ru

Поступила в редакцию 11.01.2022 г.

После доработки 24.01.2022 г.

Принята к публикации 24.01.2022 г.

Получены квантовые точки (КТ) CdSe, CdSe/CdS в различных реакционных средах (водно-этанольная смесь, диэтиленгликоль, глицерин). Изучено влияние реакционной среды, продолжительности и температуры синтеза на размер и фотолюминесцентные свойства КТ. Использование глицерина в качестве реакционной среды позволяет получить КТ CdSe без оболочки с высокой интенсивностью фотолюминесценции в диапазоне 600–700 нм, для которых полоса дефектов люминесценции практически отсутствует. Нарращивание оболочки CdS на квантовых точках CdSe способствует увеличению квантового выхода от 3.5 до 20% и уменьшению полной ширины на уровне половины высоты люминесценции по сравнению с нанокристаллами без оболочки. Разработаны нанокмозиты на основе полиметилметакрилата и полученных КТ для их дальнейшего применения в качестве лазерно-активных сред.

DOI: 10.56304/S1992722322030190

ВВЕДЕНИЕ

В связи с развитием перспективных направлений и технологий возрастает интерес к оптически прозрачным полимерам с введенными полупроводниковыми нанокристаллами или квантовыми точками (КТ), которые являются перспективными для создания люминесцентно-солнечных концентраторов, волноводов, лазерно-активных сред [1–3].

Наиболее технологичными полимерными матрицами с необходимым комплексом оптических и физико-химических свойств в настоящее время является полиметилметакрилат (ПММА), которому посвящено наибольшее количество исследований [2, 4]. Наряду с ПММА и сополимерами метилметакрилата в качестве матриц исследуются эпоксиполимеры, полистирол, полиэфирные смолы [5–7].

Среди КТ наиболее популярны полупроводниковые соединения кадмия (сульфиды, селениды), так как данные нанокристаллы обладают узкой полосой эмиссии, широким спектром возбуждения, эффективностью излучения, а также высокой фотохимической устойчивостью [8, 9].

Для получения полупроводниковых КТ соединений кадмия важно контролировать размер и форму получаемых частиц, поскольку эти параметры влияют на фотолюминесцентные и физико-химические свойства лазерной среды. Поэтому методы синтеза КТ должны быть основаны на хорошо контролируемых и хорошо воспроизводимых процессах.

Среди их большого разнообразия коллоидный метод синтеза нанокристаллов привлекателен тем, что для его реализации не требуется дорогостоящего и технически-сложного оборудования, методики синтеза допускают значительное масштабирование [10, 11]. Квантовым точкам, полученным жидкофазными методами, свойственны высокая степень монодисперсности, спектральная чистота, а также возможность прямого введения их в полимерную матрицу для создания лазерно-активных сред.

Однако данный метод обладает рядом недостатков, таких как низкая степень кристалличности, снижение эффективности люминесценции, значительная люминесценция дефектов и, как следствие, низкие значения квантового выхода. Появление дефектов на поверхности КТ вызвано

большой удельной площадью поверхности. Концентрация поверхностных дефектов зависит от условий метода синтеза и наличия/типа оболочки. Дефекты играют роль ловушек для носителей заряда и экситонов, что приводит к ухудшению фотолюминесцентных свойств из-за увеличения числа безызлучательных рекомбинаций [12].

Для уменьшения подобного эффекта “ловушки” пассивируют, совершенствуя методику получения КТ. Совершенствование метода синтеза заключается в замене исходных реагентов и растворителей. Известно большое количество работ, где синтез КТ проводится в водных средах [13, 14].

Синтез в органических растворителях, хоть и дает КТ высокого качества, но является намного более дорогим, чем водный, и использует токсичные реактивы [15, 16]. Интересен водно-органический метод синтеза, дающий доступ к КТ, сходным по качеству с получаемыми по органическим методикам, но использующий безопасную реакционную среду [17, 18].

Повысить эффективность люминесценции КТ соединений кадмия можно за счет наращивания оболочки из более широкозонного полупроводника. Оболочка пассивирует поверхностные дефекты, при этом увеличивается квантовый выход люминесценции с 19 до 39% при покрытии КТ CdS оболочкой из ZnS [19], а при покрытии CdTe оболочкой из CdS люминесценция достигает максимума в 60% [20].

В случае покрытия КТ CdS и ZnSe оболочкой с более узкой запрещенной зоной, например CdSe, квантовый выход люминесценции повышается до 20–40% [21].

Для структуры ядро/оболочка с энергетически смещенной запрещенной зоной характерно незначительное увеличение квантового выхода, а иногда и его уменьшение [22]. Покрытие КТ CdTe оболочкой из CdSe снижает квантовый выход фотолюминесценции с 39 до 32% [23].

Полупроводниковые КТ, покрытые оболочкой, получают различными методами, а именно CVD [24, 25], SILAR [26, 27], метод горячей инъекции [28, 29], электрохимический [30, 31] и однореакторный метод [32, 33]. Среди них можно выделить SILAR и однореакторный методы синтеза. В методе SILAR (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction) подложка с исходным реагентом поочередно погружается в растворы с прекурсорами катионов и анионов с промывкой дистиллированной водой между погружениями [34].

В однореакторном методе синтеза все реакции происходят в одной системе. Контролируемые параметры процесса – время, температура и концентрация исходных реагентов. Основным преимуществом данного метода является то, что он позволяет снизить затраты, необходимые для получения КТ с высокой эффективностью люми-

несценции, а также получить продукт в жидкой фазе.

Цель настоящего исследования – разработка способа получения КТ CdSe, CdSe/CdS с улучшенными фотолюминесцентными свойствами и оценка применимости данных наноструктур в качестве лазерно-активных сред.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использованы: бидистиллированная вода, гидроксид натрия (99.5%), глицерин (99.5%), дигидрат ацетата кадмия (98%), диэтиленгликоль (99.5%), *n*-гептан (99.8%), олеиновая кислота (97%), селен металлический порошок (99%), сульфит натрия безводный (99.9%), тиоацетамид, этанол.

Синтез КТ CdSe в водно-этанольной среде. Навеску NaOH массой 0.72 г растворяли в 40 мл водно-этанольной смеси и нагревали до 50°C при перемешивании. Далее к полученному раствору добавляли последовательно 10 мл олеиновой кислоты и 1 М раствор Cd(CH₃COO)₂. Затем в реакционную смесь, нагретую до 60°C, вводили 0.2 М раствор Na₂SeSO₃. Полученный раствор термостатировали при температурах 60 и 75°C. Для термостатирования при более высоких температурах реакционную смесь помещали в автоклав и выдерживали при 100–180°C в течение 1.5 ч.

Синтез КТ CdSe в диэтиленгликоле. Навеску NaOH 0.72 г растворяли в 2 мл дистиллированной воды и нагревали до 80°C при перемешивании. Далее к полученному раствору добавляли 30 мл диэтиленгликоля и 10 мл олеиновой кислоты. Затем в реакционную смесь, нагретую до 100°C, вводили 1 М раствор Cd(CH₃COO)₂. После чего в смесь, нагретую до температуры синтеза, вводили 0.2 М раствор Na₂SeSO₃. Полученный раствор выдерживали в течение 30 мин при постоянном интенсивном перемешивании и требуемой температуре.

Синтез КТ CdSe в глицерине. Навеску NaOH 0.72 г растворяли в 2 мл дистиллированной воды и нагревали до 80°C. Далее к полученному раствору при интенсивном перемешивании (не менее 800 об./мин) добавляли 30 мл глицерина и 10 мл олеиновой кислоты. Затем в реакционную смесь, нагретую до 100°C, вводили 1 М раствор Cd(CH₃COO)₂. После чего в смесь, нагретую до температуры синтеза, вводили 0.2 М раствор Na₂SeSO₃. Полученный раствор выдерживали в течение 15 мин при постоянном интенсивном перемешивании и требуемой температуре. Охлаждали раствор при постоянном перемешивании.

Синтез КТ CdSe/CdS. Наращивание оболочки CdS на поверхности КТ CdSe проводили методом однореакторного синтеза. Для этого реакционную

Таблица 1. Размер частиц и ширина запрещенной зоны КТ CdSe, CdSe/CdS, полученных в различных условиях

Образец	Реакционная среда	Температура синтеза	Положение середины экситонного пика, нм	Средний размер частиц, нм	Ширина запрещенной зоны, эВ
CdSe	Вода + этанол	60	455	2.0	3.0
CdSe	Вода + этанол	75	468	2.1	2.9
CdSe	Вода + этанол	100	480	2.2	2.8
CdSe	Вода + этанол	160	561	3.2	2.2
CdSe	Вода + этанол	180	613	5.2	1.9
CdSe	Диэтиленгликоль	110	510	2.5	2.6
CdSe	Диэтиленгликоль	150	543	2.9	2.3
CdSe/CdS	Диэтиленгликоль	150	557	3.1	2.2
CdSe	Глицерин	120	550	3.0	2.3
CdSe/CdS	Глицерин	120	565	3.3	2.2
CdSe	Глицерин	150	568	3.4	2.2
CdSe/CdS	Глицерин	150	594	4.3	2.5

смесь, содержащую КТ CdSe и $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, нагревали до 75°C , затем вводили 2.5 мл 0.2 М раствора тиацетамида при постоянном перемешивании.

Для выделения полученных КТ CdSe, CdSe/CdS к раствору добавляли *n*-гептан в соотношении (по объему) 1 : 1, затем после интенсивного перемешивания смесь разделяли и слой с остатками прекурсоров сливали.

Для очистки полученных КТ от остатков прекурсоров проводили переосаждение этиловым спиртом с последующей реэкстракцией. К раствору КТ CdSe, CdSe/CdS в гептане добавляли этиловый спирт. Далее смесь центрифугировали при 3500 об./мин в течение 10 мин для выделения осадка КТ. Переосаждение и реэкстракцию проводили дважды, очищенный продукт растворяли в *n*-гептане.

Определение среднего размера частиц проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEOL JEM-2100F при ускоряющем напряжении 200 кэВ и увеличении $\times 1000000$.

Спектры поглощения образцов снимали с использованием спектрофотометра Varian Cary 50, спектры фотолюминесценции снимали с использованием люминесцентного спектрометра Perkin Elmer LS 55, исследования кинетики люминесценции проводили при возбуждении излучением импульсного лазера на кристалле Nd:YAG Ekspla 2143A с использованием люминесцентного спектрометра Princeton Instrument Acton 2500i.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для всех образцов КТ, синтезированных в различных средах, сняты спектры поглощения (рис. 1). На основе анализа полученных спектров поглощения были рассчитаны размеры КТ CdSe с помощью эмпирического уравнения

$$D = (1.6122 \times 10^{-9})\lambda^4 - (2.6575 \times 10^{-6})\lambda^3 + (1.6242 \times 10^{-3})\lambda^2 - 0.4277\lambda + 41.57,$$

позволяющего определить средний размер нанокристаллов исходя из положения экситонного пика [35]. Данное уравнение описывает калибровочную кривую размеров КТ CdSe с использованием положений их первых пиков поглощения и объединяет литературные данные и результаты экспериментов.

Ширину запрещенной зоны полученных КТ определяли методом Тауца. Для этого зависимость интенсивности поглощения от длины волны перестраивали в соответствии с уравнением Тауца в координатах $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$, где α – это коэффициент поглощения, учитывающий оптический путь в кварцевой кювете (1 см), показатель степени 2 характеризует прямые разрешенные переходы в КТ CdSe. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Для оценки среднего размера полученных образцов использовали ПЭМ. На рис. 2 представлены ПЭМ-изображения КТ CdSe, CdSe/CdS, полученных в глицерине при температуре 150°C . Средний размер частиц CdSe составил 3.4 нм, что хорошо согласуется с данными, полученными на основе теоретических расчетов (3.5 нм). Для КТ

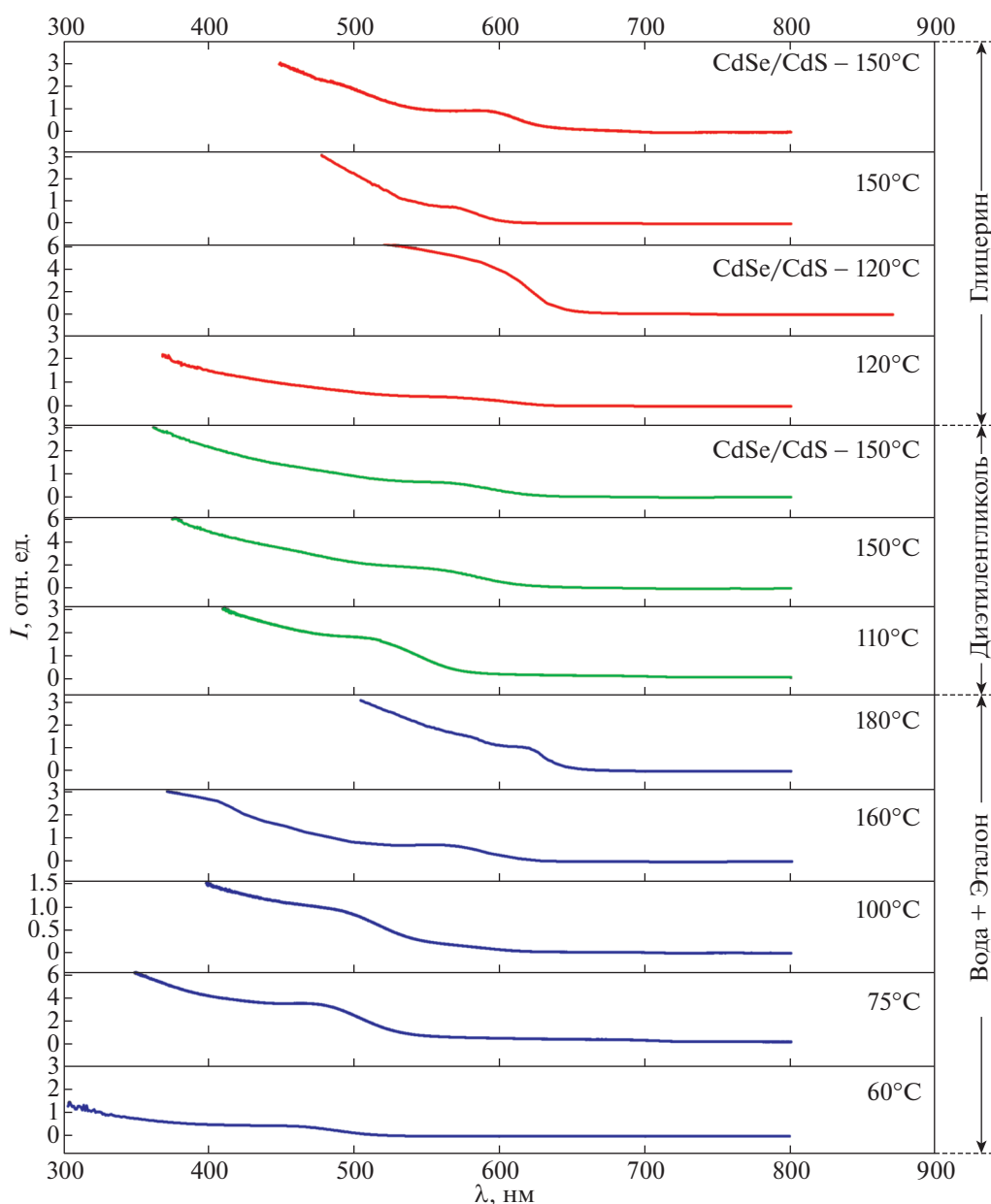


Рис. 1. Спектры поглощения квантовых точек CdSe, CdSe/CdS, полученных в различных средах.

CdSe/CdS со структурой ядро/оболочка наблюдали увеличение размера до 4.3 нм. Полученные нанокристаллы характеризуются высокой монодисперсностью.

Температура являлась основным лимитирующим фактором, определяющим размер КТ в процессе синтеза.

В работе получены КТ CdSe в водно-этанольной среде со средним размером от 2.0 до 5.2 нм. При этом температура синтеза изменялась от 60 до 180°C соответственно. Выявлено, что увеличение температуры синтеза выше 100°C негативно сказывается на распределении частиц по разме-

рам из-за невозможности инъекции прекурсоров при высокой температуре, что усиливает вклад оствальдова созревания в процесс роста частиц. Поэтому для синтеза КТ в водно-этанольной среде наиболее оптимален температурный диапазон до 100°C, позволяющий получать нанокристаллы размером до 2.2 нм. Продолжительность синтеза варьировалась от нескольких минут до 48 ч (температура синтеза 60°C), при этом размер частиц увеличивался незначительно от 1.8 до 2.3 нм. Увеличение продолжительности синтеза свыше 1.5 ч приводило к неконтролируемому росту частиц и их агрегации.

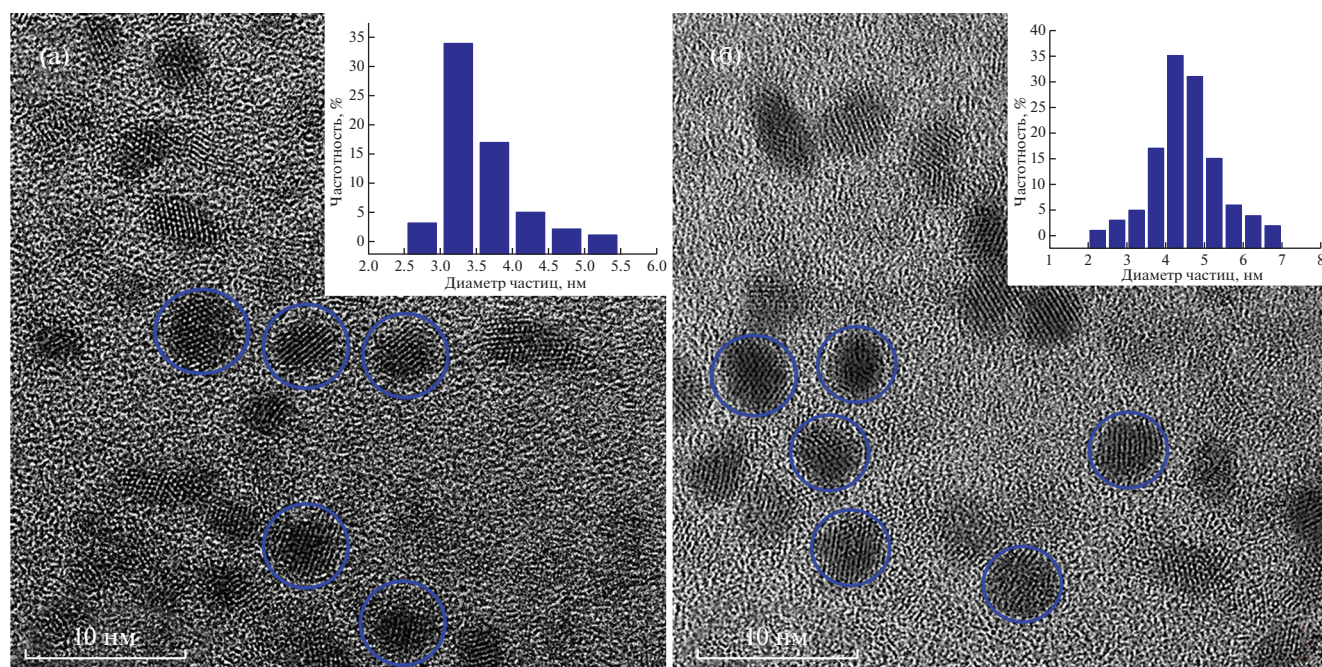


Рис. 2. ПЭМ-изображения и гистограммы распределения частиц по размерам для КТ CdSe (а), CdSe/CdS (б), полученных в глицерине при 150°C.

На рис. 3 приведены нормированные спектры люминесценции КТ, полученных в водно-этанольной среде. Каждый спектр состоит из достаточно узкой линии, соответствующей экситонной люминесценции и более длинноволновой широкой линии, обычно ассоциируемой с дефектами на поверхности КТ. Из рисунка видно, что по мере роста температуры от 60 до 180°C экситонный пик люминесценции сдвигается от 525 до 630 нм, при этом наблюдается уширение пиков, что связано с увеличением полидисперсности полученных нанокристаллов. Вклад люминесценции дефектов увеличивается при повышении температуры синтеза. Увеличение продолжительности синтеза также оказывает негативное влияние на фотолюминесцентные свойства КТ, приводя к усилению люминесценции дефектов относительно экситонной люминесценции.

Для синтеза КТ размером от 2.5 до 3.0 нм в качестве реакционной среды использовали диэтиленгликоль. Нагрев реакционной среды выше 150°C не приводил к дальнейшему росту частиц более 3.0 нм. На рис. 4 представлены спектры возбуждения и люминесценции наночастиц CdSe, полученных при 150°C в диэтиленгликоле. По спектру возбуждения образца можно судить о том, что его экситонная люминесценция достаточно эффективно возбуждается при освещении в области 500–550 нм, что позволяет использовать в качестве источника возбуждения лазеры зеленого спектра. Экситонный пик в спектре люминесценции слабо сдвинут относительно экситонного

пика в спектре возбуждения. Стоксов сдвиг составляет ~7 нм. В спектре люминесценции присутствует длинноволновое плечо, соответствующее люминесценции поверхностных дефектов КТ и значительно увеличивающее полную ширину на уровне половины высоты (**FWHM**) спектра, которая составляет в этом случае более 137 нм. Для данных образцов наблюдается частичное гашение люминесценции дефектов, однако уширение экситонного пика в спектре поглощения и значительная ширина пика фотолюминесценции

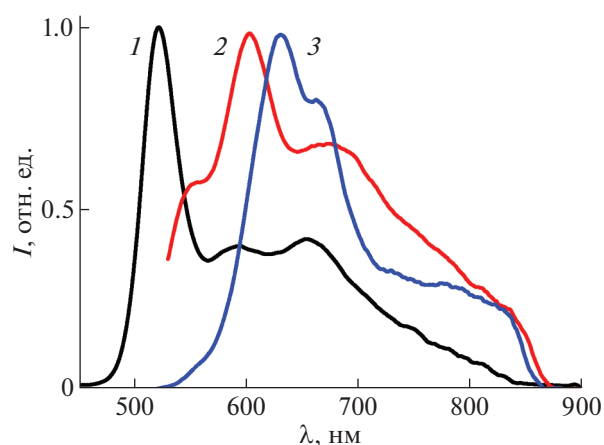


Рис. 3. Нормированные спектры фотолюминесценции КТ CdSe, полученных в водно-этанольной среде при 60 (1), 160 (2) и 180°C (3).

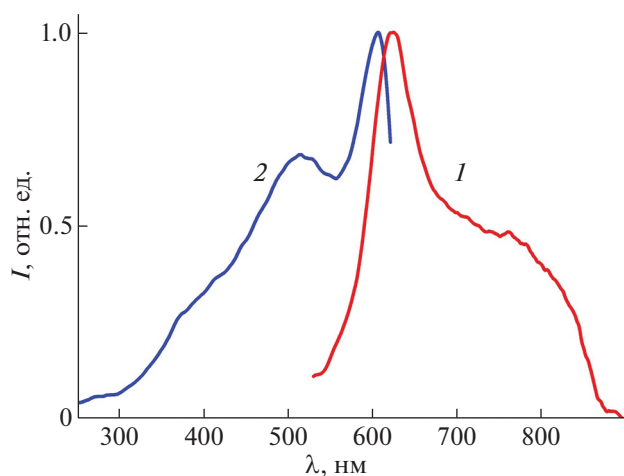


Рис. 4. Нормированные спектры фотолюминесценции (1) и возбуждения люминесценции (2) для КТ CdSe, полученных при 150°C в диэтиленгликоле.

свидетельствуют о значительной полидисперсности получаемых наночастиц.

С целью получения нанокристаллов CdSe размером более 3.0 нм синтез проводили в глицерине. Использование глицерина в качестве реакционной среды позволило получить КТ CdSe с фотолюминесценцией в диапазоне 600–700 нм.

На рис. 5 показаны спектры фотолюминесценции для КТ CdSe одного размера, полученных в различных средах. Вставка на графике показывает разницу в длинноволновой части спектра – влияние люминесценции поверхностных дефектов. Отметим, что экситонный пик люминесцен-

ции КТ, полученных в глицерине, более узкий (FWHM = 49.0 нм) и примерно в 3 раза более интенсивный. В спектре флуоресценции для данного образца почти полностью отсутствует полоса люминесценции дефектов, что не характерно для ядер без оболочки, полученных при других условиях синтеза. Эти данные могут свидетельствовать о снижении числа поверхностных дефектов КТ при синтезе в глицерине. Вероятно, более высокая вязкость глицерина по сравнению с другими средами влияет на скорость переноса реагирующего вещества к граням растущего кристалла CdSe, что позволяет получать КТ с малодефектной структурой, однако влияние природы реакционной среды на характеристики получаемых КТ требует дальнейшего изучения.

По данным результатам можно сделать вывод, что КТ CdSe, синтезированные в глицерине, обладают улучшенными фотолюминесцентными свойствами по сравнению с образцами, полученными в других средах. Однако несмотря на то что в спектрах излучения данных нанокристаллов полоса поверхностных дефектов минимизирована, существуют дефекты, которые могут приводить к безызлучательной рекомбинации экситонов и снижать суммарный квантовый выход. Для эффективной пассивации поверхностных состояний и увеличения квантового выхода ядро покрывают оболочкой из другого полупроводникового материала [36–38].

В настоящей работе получены КТ CdSe/CdS со структурой ядро/оболочка методом одnoreакторного синтеза в среде диэтиленгликоля и глицерина. Нарращивание оболочки в водно-этанольной

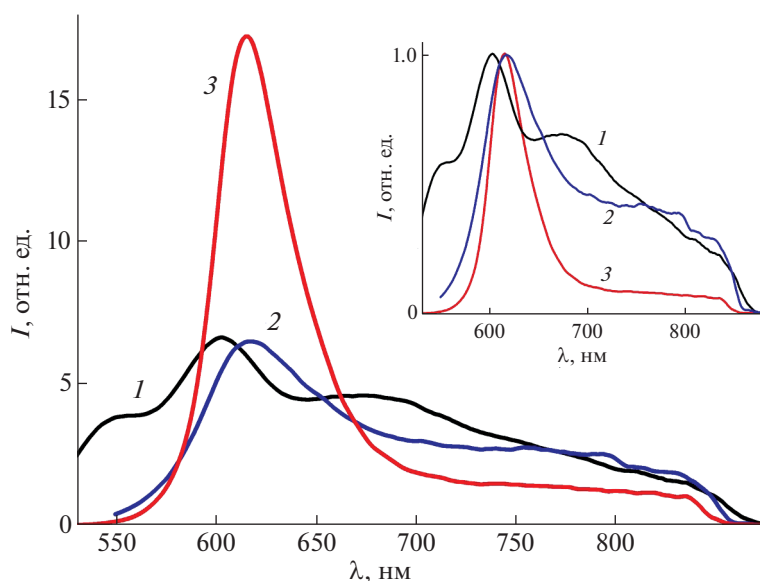


Рис. 5. Спектры фотолюминесценции для КТ CdSe, полученных в различных средах: 1 – водно-этанольная смесь, 2 – диэтиленгликоль, 3 – глицерин. На вставке представлены нормированные спектры для данных КТ.

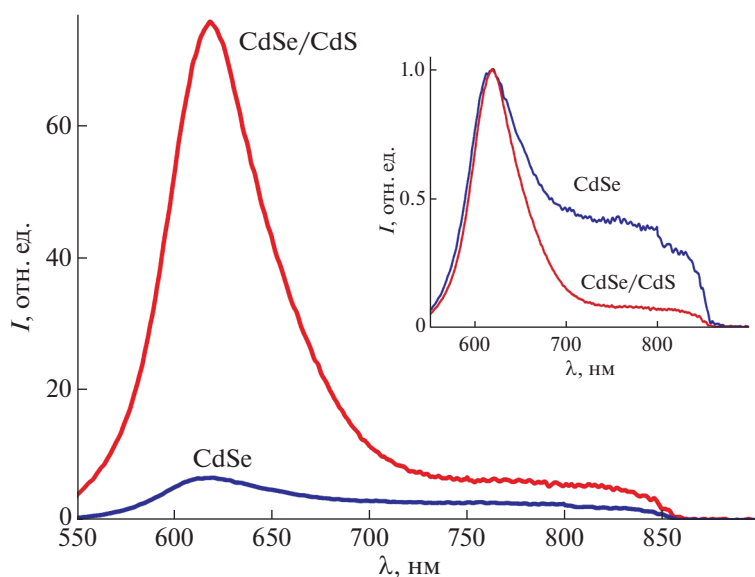


Рис. 6. Спектры фотолюминесценции КТ CdSe, CdSe/CdS, полученные при 150°C в диэтиленгликоле. На вставке нормированные спектры для данных КТ.

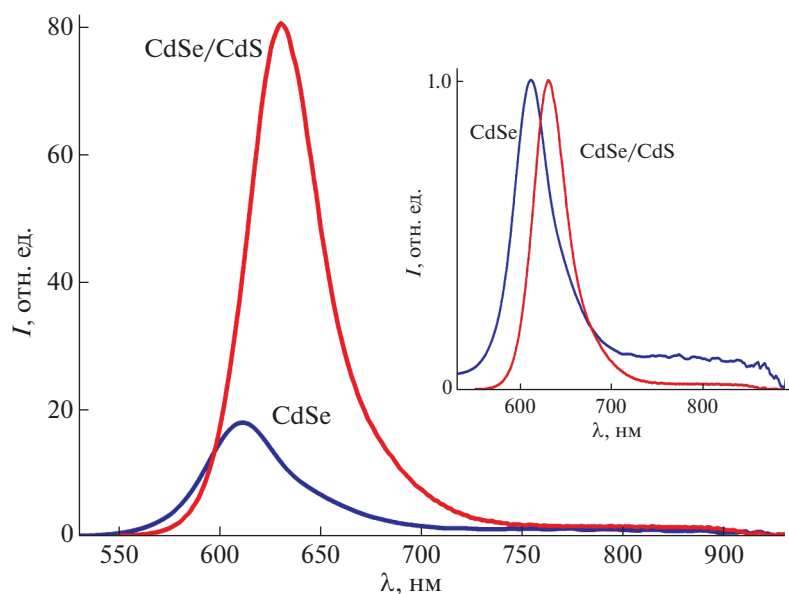


Рис. 7. Спектры фотолюминесценции КТ CdSe, CdSe/CdS, полученные при 120°C в глицерине. На вставке нормированные спектры для данных КТ.

среде затруднено, поскольку данная реакционная среда является летучей.

После наращивания оболочки средний размер КТ увеличился от 2.9 до 3.1 нм в диэтиленгликоле и от 3.0 до 3.3 нм в глицерине. На рис. 6 и 7 приведены спектры люминесценции КТ CdSe, CdSe/CdS при возбуждении ксеноновой лампой через монохроматор. Из рисунков видно, что наличие оболочки несколько смещает экситонный пик в сторону больших длин волн [36]. При этом

наблюдается значительное увеличение интенсивности люминесценции. Для КТ, полученных в глицерине, определяли квантовый выход люминесценции (при ламповой накачке), который увеличивался от 3.5 до 20% после наращивания оболочки. Формирование оболочки также приводит к небольшому уменьшению FWHM от 49.0 до 43.8 нм.

Одновременно с ростом интенсивности и квантового выхода люминесценции после нара-

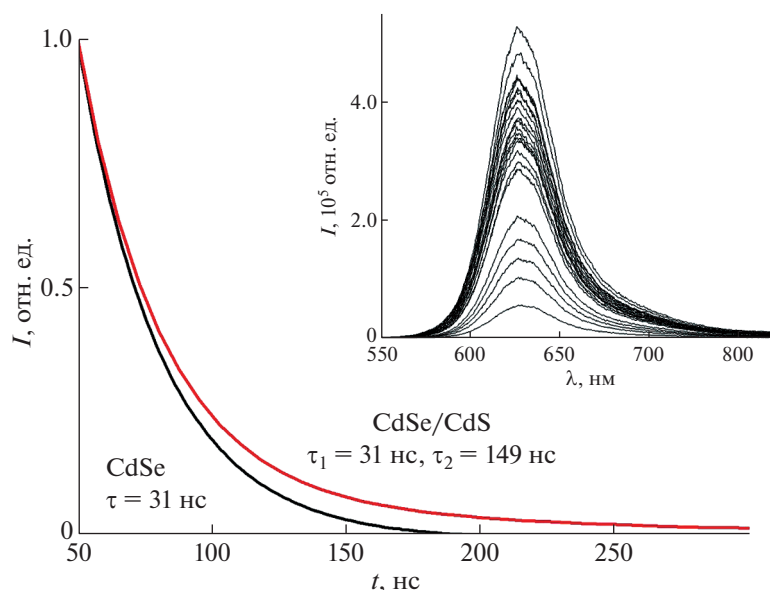


Рис. 8. Кинетика затухания люминесценции КТ CdSe, CdSe/CdS. На вставке показано изменение формы спектра с течением времени для образца CdSe/CdS.

щивания оболочки происходило заметное изменение кинетик люминесценции. На рис. 8 представлены кинетики люминесценции КТ CdSe и CdSe/CdS со структурой ядро/оболочка, полученных в глицерине. Кинетика затухания люминесценции позволяет получить дополнительные сведения о рекомбинации носителей заряда. В результате экспериментов выяснили, что кинетика люминесценции обоих типов образцов не зависит от мощности накачки лазером. Это позволяет предположить отсутствие безызлучательной оже-рекомбинации.

Для КТ CdSe спад сигнала флуоресценции со временем $I_{PL}(t)$ хорошо описывается одной экспонентой

$$I_{PL}(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

где характерное время затухания составляет $\tau = 31$ нс.

Для описания временной зависимости интенсивности флуоресценции КТ CdSe/CdS со структурой ядро/оболочка оказалось недостаточно одной экспоненты. В этом случае затухание флуоресценции хорошо аппроксимировалось суммой двух спадающих экспонент

$$I_{PL}(t) = A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right),$$

где по-прежнему $\tau_1 = 31$ нс, а время затухания второй экспоненты $\tau_2 = 149$ нс. При этом вклад более долгоживущего процесса составляет $\sim 10\%$. Наличие в зависимости $I_{PL}(t)$ для КТ CdSe/CdS со структурой ядро/оболочка второго экспоненциаль-

ного слагаемого говорит о том, что в этом случае подключается еще один независимый излучательный процесс с меньшей скоростью рекомбинации. Можно предположить, что он соответствует излучению экситонов, связанных на состояниях на границе между ядром и оболочкой.

На основе полученных КТ CdSe, CdSe/CdS разработаны полимерные нанокompозиты. В качестве матрицы был выбран термопластичный полимер ПММА. ПММА прозрачен для видимой и УФ-области спектра, на его основе можно получать однородные пленки, содержащие КТ.

Нанокompозиты на основе ПММА, содержащие КТ CdSe, CdSe/CdS, представляли собой пленки, нанесенные на стеклянную подложку. Подложки предварительно были отмыты, высушены и обработаны кислородной плазмой. Для улучшения волноводных и адгезионных свойств методом центрифугирования наносили слой на основе гидролизованного тетраэтоксисилана толщиной не менее 200 нм [39]. ПММА растворяли в растворе, содержащем КТ. Концентрация введенных КТ для всех образцов составляла 10^{-3} моль/л. Затем раствор наносили на подготовленные подложки методом центрифугирования, так чтобы толщина активного слоя составляла ~ 2 мкм. На последнем этапе полученные композиты сушили в вакууме при 60°C для удаления остатков растворителя.

Были проведены исследования фотолюминесцентных свойств полученных нанокompозитов [40]. Выявлено, что спектр люминесценции пленки, содержащей КТ, полученных в различных средах, был практически идентичен спектру люминесценции соответствующего раствора КТ,

что свидетельствует о сохранении фотолюминесцентных свойств данных нанокристаллов после их введения в полимерную матрицу. Для нанокompозитов, содержащих КТ, полученных в водно-этанольной среде и диэтиленгликоле, интенсивность люминесценции была слишком низкой по сравнению с пленками на основе КТ, полученными в глицерине. Следовательно, более привлекательны для дальнейшей разработки лазерно-активных сред образцы КТ CdSe, CdSe/CdS, полученных в глицерине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены коллоидные КТ CdSe в различных средах с размерами от 2.0 до 5.2 нм, способные флуоресцировать в видимом диапазоне длин волн. КТ CdSe, полученные в глицерине, отличались улучшенными фотолюминесцентными свойствами и высокой степенью монодисперсности по сравнению с нанокристаллами, полученными в других средах. Использование глицерина в качестве реакционной среды позволило минимизировать поверхностные дефекты без создания структуры ядро/оболочка.

Наращивание оболочки из широкозонного полупроводника CdS позволило увеличить квантовый выход и эффективно пассивировать поверхностные состояния КТ CdSe. Средний размер КТ после наращивания оболочки увеличился на 0.2–0.9 нм. Для КТ CdSe/CdS, полученных в глицерине, квантовый выход увеличился от 3.5 до 20%, FWHM люминесценции уменьшилась от 49.0 до 43.8 нм.

Разработаны нанокompозиты на основе ПММА, содержащие квантовые точки CdSe, CdSe/CdS. Полученные полимерные пленки демонстрировали фотолюминесцентные свойства, практически идентичные исходным растворам КТ. Данная разработка является перспективной для создания лазерно-активных сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Meinardi F., Colombo A., Velizhanin K.A. et al.* // Nature Photon. 2014. V. 8. № 5. P. 392. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.54>
2. *Suarez I., Gordillo H., Abargues R. et al.* // Nanotechnology. 2011. V. 22. P. 435202. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/43/435202>
3. *Anni M.* // Nanomaterials. 2019. V. 9. P. 1036. <https://doi.org/10.3390/nano9071036>
4. *Gordillo H., Suárez I., Abargues R. et al.* // J. Nanomater. 2012. V. 4. P. 1. <https://doi.org/10.1155/2012/960201>
5. *Kopylova T.N., Telminov E.N., Tabakaev D.S. et al.* // Russian Physics J. 2017. V. 59. № 10. P. 1599. <https://doi.org/10.1007/s11182-017-0950-9>
6. *Lei Z., Fabiani D., Bray T. et al.* // IEEE Trans Dielectr Electr Insul. 2021. V. 28. № 3. P. 753. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2021.009223>
7. *Kausar A.* // Mater. Res. Innov. 2020. V. 24. № 4. P. 235. <https://doi.org/10.1080/14328917.2019.1636175>
8. *Yu W.W., Qu L., Guo W. et al.* // Chem. Mater. 2003. V. 15. № 14. P. 2854. <https://doi.org/10.1021/cm034081k>
9. *Surana K., Singh P.K., Rhee H-W. et al.* // J. Ind. Eng. Chem. 2014. V. 20. № 6. P. 4188. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.01.019>
10. *Wang Y., Lu J.P., Tong Z.F.* // Bull. Mater. Sci. 2010. V. 33. № 5. P. 543. <https://doi.org/10.1039/C4GC00300D>
11. *Chang Y., Yau X., Mi L. et al.* // Green Chem. 2015. V. 17. № 8. P. 4439. <https://doi.org/10.1039/C5GC01109D>
12. *Bera D., Qian L., Tseng T.-K. et al.* // Materials (Basel). 2010. V. 3. № 4. P. 2260. <https://doi.org/10.3390/ma3042260>
13. *Almendral-Parra M.J., Alonso-Mateos A., Boyero-Benito J.F. et al.* // J. Nanomater. 2014. V. 2014. P. 397469. <https://doi.org/10.1155/2014/397469>
14. *Mazing D.S., Matyushkin L.B., Aleksandrova O.A. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 572. P. 012028. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/572/1/012028>
15. *Liu J., Gu Y., Wu Q. et al.* // Crystals. 2019. V. 9. № 368. <https://doi.org/10.3390/cryst9070368>
16. *Dickson R.E., Hu M.Z.* // J. Mater. Res. 2015. V. 30. № 7. P. 890. <https://doi.org/10.1557/jmr.2015.57>
17. *Singh A., Tripathi V.S., Neogy S. et al.* // Mater. Chem. Phys. 2018. V. 214. P. 320. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.04.116>
18. *Shamilov R.R., Nuzhdin V.I., Valeev V.F. et al.* // Tech. Phys. 2016. V. 61. № 11. P. 1698. <https://doi.org/10.1134/S1063784216110220>
19. *Soheyliya R., Behrouzi S., Sharifirad Z. et al.* // Ceram. Int. 2019. V. 45. P. 11501. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.03.019>
20. *Thuy U.T.D., Tu L.A., Loan N.T. et al.* // Opt. Mater. 2016. V. 53. P. 34. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.01.022>
21. *Reiss P., Protière M., Li L.* // Small. 2009. V. 5. № 2. P. 154. <https://doi.org/10.1002/smll.200800841>
22. *Son M., Kim S., Lee Y. et al.* // J. Alloys Compd. 2021. V. 886. P. 161233. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161233>
23. *Hien N.T., Chi T.T.K., Vinh N.D. et al.* // J. Lumin. 2019. V. 217. P. 116822. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.116822>
24. *Lan J., Gao M., Haw C. et al.* // Phys. Lett. A. 2020. V. 384. № 26. P. 126708. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2020.126708>
25. *Luo Q., Yuan R., Hu Y.-L. et al.* // Appl. Surf. Sci. 2021. V. 537. P. 147930. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147930>

26. *Ganjian M., Kolahdouz M., Aletayeb A. et al.* // *Vacuum*. 2017. V. 146. P. 548.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.02.007>
27. *Mustakim N.S.M., Ubani C.A., Sepeai S. et al.* // *Solar Energy*. 2018. V. 163. P. 256.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.003>
28. *Marandi M., Abadi S.H.* // *Solar Energy*. 2020. V. 209. P. 387.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.059>
29. *Fernández-Delgado N., Herrera M., Tavabi A.H. et al.* // *Appl. Surf. Sci.* 2018. V. 457. P. 93.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.06.149>
30. *Park J.H., Jin S-M., Lee E. et al.* // *Chem. Sci.* 2021. V. 12. № 40. P. 13557.
<https://doi.org/10.1039/D1SC03625D>
31. *Robinson D.A., White H.S.* // *Nano Lett.* 2019. V. 19. № 8. P. 5612.
<https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b02144>
32. *Kurilov A.D., Chausov D.N., Osipova V.V. et al.* // *J. Mol. Liq.* 2021. V. 339. P. 116747.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116747>
33. *Shamilov R.R., Nuzhdin V.I., Valeev V.F. et al.* // *Tech. Phys.* 2016. V. 61. № 11. P. 1698.
<https://doi.org/10.1134/S1063784216110220>
34. *Chandra P.P., Mukherjee A., Mitra P.* // *J. Mater.* 2014. V. 2014. P. 138163.
<https://doi.org/10.1155/2014/138163>
35. *Yu W.W., Qu L., Guo W. et al.* // *Chem. Mater.* 2003. V. 15. P. 2854.
<https://doi.org/10.1021/cm034081k>
36. *Saidzhonov B.M., Kozlovsky V.F., Zaytsev V.B. et al.* // *J. Lumin.* 2019. V. 209. P. 170.
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.01.052>
37. *Zhu C.-Q., Wang P., Wang X. et al.* // *Nanoscale Res. Lett.* 2008. V. 3. P. 213.
<https://doi.org/10.1007/s11671-008-9139-z>
38. *Liu X., Jiang Y., Lan X. et al.* // *Mater. Chem. Phys.* 2011. V. 130. P. 909.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.08.009>
39. Патент № 266181 “Фотовозбуждаемый органический тонкопленочный лазер на основе полиметилметакрилата”; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский Томский государственный университет (ТГУ, НИ ТГУ) (RU) — № 2016150444; заявл. 21.12.2016; опубл. 06.09.2018.
40. *Степанова У.А., Мурадова А.Г., Аль-Майяхи Х. и др.* // *Изв. вузов. Физика*. 2021. Т. 64. № 12. С. 166.
<https://doi.org/10.17223/00213411/64/12/166>