

## **Люминесцентные композиты на основе коллоидных квантовых точек CdSe/CdS и полиметилметакрилата**

Квантовые точки (КТ) представляют в последнее время большой интерес как люминесцентные материалы. Они обладают рядом преимуществ перед органическими флуорофорами. Квантовые точки фотостабильны, обладают узким эмиссионным спектром и широкой полосой поглощения. Главная практически важная особенность полупроводниковых нанокристаллов – зависимость спектра люминесценции от размера частиц. Это свойство обуславливает возможность применения квантовых точек в тех областях, где требуются варьируемые по длине волны оптические свойства. Квантовые точки могут найти применение в качестве материала для светодиодов, солнечных батарей, могут использоваться как биометки. Возможность существования в виде зольей делает квантовые точки привлекательными с технологической точки зрения, позволяет встраивать их в различные матрицы.

Одна из задач работы состоит в исследовании изменения квантового выхода и длины волны люминесценции с ростом оболочки. При этом важно знать, как меняются спектры оптического поглощения. Целью работы является получение и исследование свойств люминесцентного композита на основе квантовых точек и полиметилметакрилата (ПММА). В этом материале предполагается реализовать такие свойства, как фотостабильность, прозрачность в видимом диапазоне, возможность эффективного контроля его спектральных характеристик. Такой материал может найти применение в устройствах, основанных на флуоресцентном методе детекции, как образцовый источник люминесценции.

Наночастицы CdSe, стабилизированные олеиновой кислотой, были синтезированы из пересыщенного раствора в высококипящем неполярном растворителе. В качестве прекурсоров использовались олеат кадмия и триоктилфосфин селенид (TOPSe), в качестве растворителя – октадецен. Синтез оболочки CdS на полученных ядрах осуществлялся медленным добавлением TOPS в раствор, содержащий КТ CdSe и олеат кадмия. Синтезированные образцы были охарактеризованы методами спектрофотометрии и спектроскопии люминесценции. Из полученных результатов можно сделать вывод, что наращивание оболочки CdS толщиной 0,4 нм на ядрах CdSe диаметром 3 нм приводит к сдвигу максимумов поглощения и люминесценции образцов на 20 нм в красную область. При этом происходит увеличение квантового выхода люминесценции приблизительно в 6 раз.

В ходе работы синтезирован прозрачный композит на основе КТ CdSe/CdS и ПММА, обладающий люминесценцией с максимумом на 590 нм. Синтез производился растворением коллоидных КТ в метилметакрилате с его дальнейшей полимеризацией. Было выполнено несколько синтезов с различными концентрациями КТ в мономере. В отличие от методик, описанных в литературе, модификация поверхности КТ перед введением в мономер не производилась. С помощью ПЭМ показано, что нанокристаллы образуют агломераты в матрице ПММА, их размер зависит от концентрации введённых квантовых точек.

## **Отзыв научного руководителя**

на работу Саматова И.Г. “Люминесцентные композиты на основе коллоидных квантовых точек CdSe/CdS и полиметилметакрилата” представляемую на премию им. чл.-корр РАН Н.Н.Олейникова

Работа Саматова И.Г. выполнена в Московском государственном университете в лаборатории химии и физики полупроводниковых и сенсорных материалов кафедры неорганической химии химического факультета в рамках научных исследований, направленных на поиск новых материалов на основе полупроводниковых нанокристаллов. Саматов И.Г. успешно работает в лаборатории с 3 курса. За время работы он освоил методы синтеза полупроводниковых нанокристаллов, в том числе специальные методы роста в неполярных средах, а также современные методы исследования наноматериалов: оптическую спектроскопию, включая спектроскопию поглощения и люминесценции, просвечивающую электронную микроскопию. Работа Саматова И.Г. посвящена исследованию полупроводниковых нанокристаллов, перспективных с точки зрения уникальных люминесцентных свойств. В работе синтезированы и исследованы коллоидные нанокристаллы CdSe и CdSe/CdS (ядро/оболочка) и получены композиты на основе нанокристаллов и полиметилметакрилата. Личный вклад Саматова И.Г. в работу состоял в синтезе нанокристаллов, получении композитов, исследовании их люминесцентных свойств и обработке экспериментальных результатов. Полученные Саматовым И.Г. новые экспериментальные данные представляют несомненный научный интерес.

Считаю, что работа Саматова И.Г. в текущем виде может быть подана на конкурс на соискание премии им. чл.-корр РАН Н.Н.Олейникова.

Научный руководитель

**К.Х.Н., доцент  
Васильев Р.Б.**

## **Сведения об авторе работы**

**Ф.И.О.:** Саматов Иван Германович;

**Учебное заведение:** Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова, факультет наук о материалах;

**Курс:** 4-й;

**Научный руководитель:** доцент факультета наук о материалах,  
к.х.н. Васильев Роман Борисович;

**Достижения:** победитель конференции «Ломоносов-2009»  
в секции «фундаментальное материаловедение» среди 3-х курсов.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Факультет наук о материалах

Лаборатория физики и химии сенсорных и полупроводниковых материалов

Саматов Иван Германович

**Люминесцентные композиты  
на основе коллоидных квантовых точек CdSe/CdS и  
полиметилметакрилата**

Работа на соискание премии имени Н.Н.Олейникова

Научный руководитель:  
доцент, к.х.н. Васильев Р.Б.

Москва 2009

# Содержание

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>6</b>
<b>ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР .....</b>	<b>6</b>
<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ .....</b>	<b>10</b>
<b>ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ .....</b>	<b>11</b>
<b>ВЫВОДЫ.....</b>	<b>16</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>17</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ .....</b>	<b>18</b>

## **Введение**

Квантовые точки (КТ) представляют в последнее время большой интерес как люминесцентные материалы. Они обладают рядом преимуществ перед органическими флуорофорами. Квантовые точки фотостабильны, обладают узким эмиссионным спектром и широкой полосой поглощения. Главная практически важная особенность полупроводниковых нанокристаллов – зависимость спектра люминесценции от размера частиц. Это свойство обуславливает возможность применения квантовых точек в тех областях, где требуются варьируемые по длине волны оптические свойства. Квантовые точки могут найти применение в качестве материала для светодиодов, солнечных батарей, могут использоваться как биометки. Возможность существования в виде зольей делает квантовые точки привлекательными с технологической точки зрения, позволяет встраивать их в различные матрицы.

В настоящей работе были синтезированы и исследованы полупроводниковые наночастицы типа ядро-обложка CdSe/CdS. Покрытие ядра наночастицы оболочкой более широкозонного полупроводника приводит к увеличению квантового выхода люминесценции. Кроме того, с ростом оболочки происходит сдвиг полос поглощения и эмиссии в красную область. Одна из задач работы состоит в исследовании изменения квантового выхода и длины волны люминесценции с ростом оболочки. При этом важно знать, как меняются спектры оптического поглощения.

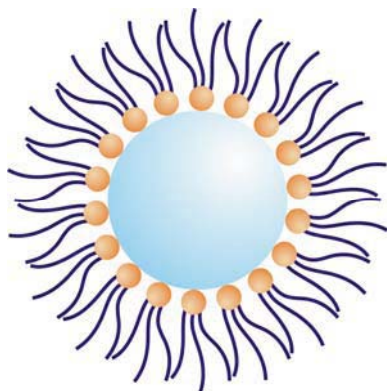
Целью работы является получение и исследование свойств люминесцентного композита на основе квантовых точек и полиметилметакрилата (ПММА). В этом материале предполагается реализовать такие свойства, как фотостабильность, прозрачность в видимом диапазоне, возможность эффективного контроля его спектральных характеристик. Такой материал может найти применение в устройствах, основанных на флуоресцентном методе детекции, как образцовый источник люминесценции.

## **Литературный обзор**

Распределение электронных состояний в нанокристалле, которое определяет многие его физические свойства, можно достаточно просто варьировать путём изменения состава нанокристалла, его формы и размеров. Комбинация свойств, зависящих от размера и формы нанокристалла, и простота изготовления и обработки делают нанокристаллы перспективными

строительными блоками для материалов с заданными свойствами, таких как неорганические люминофоры и биометки. Хорошее понимание свойств отдельных нанокристаллов позволит в полной мере использовать их свойства, делая возможным создание новых электронных, магнитных и фотонных устройств, различных функциональных материалов на основе этих наноструктур.

Коллоидный нанокристалл состоит из неорганического ядра и монослоя ПАВ, прикреплённого к его поверхности (Рис.1). Нанокристаллы, в которых неорганический материал является полупроводником, проявляют такие свойства, как зависимость ширины запрещённой зоны и положения полосы люминесценции от их размера (Рис. 2). Такие нанокристаллы называют квантовыми точками. Их сейчас широко применяют в качестве флуоресцентных меток в биомедицинских исследованиях. По сравнению с флуорофорами, используемыми в качестве биометок ранее, квантовые точки являются гораздо более яркими и фотостабильными.

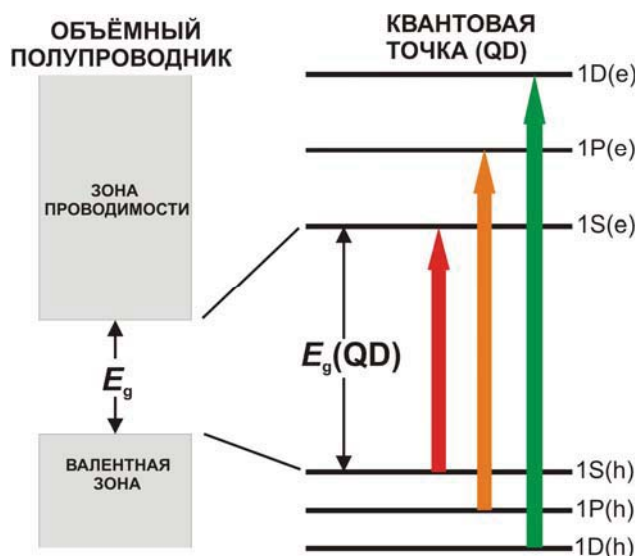


**Рисунок 1.** Схематическое изображение нанокристалла, покрытого монослоем органических лигандов

За последние десять лет многие химики пришли к выводу, что с точки зрения синтеза коллоидные нанокристаллы можно рассматривать как макромолекулы, и стратегии их синтеза во многом схожи подходам, применяемым при получении органических полимеров. Точность, с которой синтезируется желаемая структура, примерно такая же как и при синтезе полимеров. Изменение различных параметров синтеза позволяет варьировать размеры нанокристаллов и их полидисперсность.

Общего подхода к синтезу нанокристаллов, в точности соответствующим заданным характеристикам пока нет, однако общепринято, что органические ПАВ во многом влияют не только на размеры кристаллов, но и их форму.

Типичная схема синтеза коллоидных нанокристаллов включает в себя три компонента: прекурсоры, органические ПАВ и растворители. В некоторых случаях ПАВ может выступать в качестве растворителя. При нагреве реакционной среды до достаточно высокой температуры



**Рисунок 2.** Появление энергетических уровней и увеличение ширины запрещённой зоны при переходе от объёмного полупроводника к квантовой точке

прекурсоры превращаются в активные атомные или молекулярные фрагменты. Далее они образуют кластеры, на дальнейший рост которых в большой степени влияет наличие стабилизаторов – органических ПАВ. Формирование нанокристалла происходит в две стадии: образование зародышей (нуклеация) и их рост. На стадии зародышеобразования прекурсоры разлагаются или реагируют друг с другом при достаточно высокой температуре, создавая тем самым пересыщенный раствор мономера, после чего происходит «взрывная» нуклеация нанокристаллов. Далее образовавшиеся зародыши присоединяют дополнительные мономеры, оставшиеся в реакционной среде.

Важным шагом при создании неорганических нанокристаллов является выбор подходящих прекурсоров, таких как металлоорганические соединения. Прекурсоры должны быстро реагировать или разлагаться при заданной температуре роста, чтобы образовывать активные атомные или молекулярные фрагменты, которые вызывают нуклеацию и последующий рост зародышей. Стоит отметить, что на микроскопическом уровне механизм кристаллизации не вполне изучен, во многом из-за сложности реакционной среды [1].

Единственным методом, позволяющим с хорошей точностью измерить размер квантовой точки, является просвечивающая электронная микроскопия. В работе [2] было показано, что коэффициент экстинкции КТ CdTe, CdSe и CdS на первом максимуме поглощения находится в строгой зависимости от их размера. Кроме того, в работе [2] представлена калибровочная зависимость размера исследуемых КТ от длины волны первого экситонного максимума. Эти данные позволяют оценивать концентрацию, размеры и полидисперсность КТ по данным спектрофотометрии.

Стоит отметить, что метод гравиметрии не является прецизионным для измерения количественных характеристик коллоидных КТ. Это связано с тем, что стехиометрия между нанокристаллами и окружающими их органическими ПАВ отсутствует. Кроме того, количество лигандов, окружающих квантовую точку, может меняться при различных процедурах выделения и очистки.

Можно сказать, что квантовые точки, размер которых меньше радиуса экситона Бора, представляют класс материалов, промежуточных между отдельными молекулами и объёмными материалами. Пространственное ограничение электрона и дырки во всех трёх измерениях приводит к увеличению ширины запрещённой зоны материала с уменьшением размера кристаллита. Следовательно, полосы поглощения и испускания КТ смещаются в синюю область с уменьшением их размеров. Структурные исследования показали, что несмотря на свой малый размер (2-10 нм), КТ имеют кристаллическую структуру и параметры ячейки такие же, как и у объёмного материала.



В зарубежной литературе существуют публикации, посвящённые введению наночастиц в полимерные матрицы. Авторы работы [4] сообщают о создании прозрачного композита на основе коллоидных квантовых точек CdS размером около 5 нм и полиметилметакрилата. Синтез композита производился с помощью радикальной полимеризации раствора квантовых точек в метилметакрилате. Для обеспечения равномерного распределения частиц в ПММА в работе производилась модификация поверхности КТ, присоединением к ним молекул (MPS), обладающим высоким сродством к реакционной среде. В работе синтезированы композиты со сравнительно большими содержаниями нанокристаллов (от 1 до 6 массовых %). Распределение частиц в объёме композита характеризуется как равномерное (отсутствуют агломераты), что подтверждается данными просвечивающей электронной микроскопии. Показано, что в синтезированных образцах сохраняется люминесценция, эмиссионные спектры исходных нанокристаллов и полученных композитов практически не отличаются. Важным является то, что спектральные характеристики квантовых точек сохраняются как на стадии модификации поверхности, так и при полимеризации MMA.

Квантовые точки типа ядро-оболочка обладают новыми свойствами и являются привлекательными как с экспериментальной, так и с практической точки зрения. Было показано, что покрытие ядра квантовой точки оболочкой более широкозонного полупроводника приводит к увеличению квантового выхода люминесценции. Это происходит благодаря пассивации поверхностных электронных состояний и уменьшению доли безызлучательной рекомбинации электронно-дырочных пар.

В работе [3] сообщается о синтезе хорошо люминесцирующих квантовых точек CdSe/ZnS с размерами ядер CdSe от 2,3 до 5,5 нм. Полученные квантовые точки обладают узкими полосами эмиссии, которые покрывают большую часть видимого спектра (от 470 до 625 нм), а также высокими квантовыми выходами (30-50 % при комнатной температуре). Спектроскопии поглощения и люминесценции показывают пассивирующее влияние оболочки ZnS на электронную структуру ядра CdSe. Кроме того, в работе [3] рост оболочки на поверхности ядра локально характеризуется как эпитаксиальный; в этой работе также говорится о том, как структура оболочки ZnS влияет на люминесцентные свойства КТ. Экспериментально показано, что квантовый выход достигает максимума при толщине оболочки, соответствующей ~1,3 монослою ZnS. Уменьшение квантового выхода при дальнейшем наращивании оболочки объясняется образованием дефектов в структуре оболочки ZnS.

## Экспериментальная часть

Методом получения наночастиц, исследуемых в работе, является коллоидный синтез. Его основными преимуществами являются его невысокая стоимость и возможность получения частиц нужного размера. Варьирование температуры, времени синтеза и использование различных систем стабилизатор-растворитель позволяет получать частицы с размерами от 2 до 6 нм и длинами волн эмиссии, покрывающими большую часть видимого диапазона. Важной является возможность *in-situ* контроля полосы люминесценции, которая позволяет получать КТ с заданными спектральными характеристиками, отслеживая их в ходе синтеза.

Наночастицы CdSe, стабилизированные олеиновой кислотой, синтезированы из пересыщенного раствора в высококипящем неполярном растворителе (Рис. 3). В качестве прекурсоров использовались олеат кадмия и триоктилфосфин селенид (TOPSe), в качестве растворителя – октадецен. Требуемая степень пересыщения достигалась инжектированием TOPSe в раствор олеата кадмия. По истечении заданного времени роста частиц производилась закалка реакционной смеси. Температура роста нанокристаллов составляла 240, 260 и 290 °С. Серия синтезов при температурах, превосходящих 300 °С, закончилась образованием непрозрачного нелюминесцирующего раствора, что свидетельствует об образовании крупных частиц при данных условиях.

Синтез оболочки CdS на поверхности ядер CdSe осуществлялся медленным добавлением TOPS (прекурсора серы) в раствор, содержащий КТ CdSe и олеат кадмия. Температура реакционной смеси поддерживалась равной 200 °С, 1 М раствор TOPS добавлялся по каплям со скоростью ~0,3 мл/час. При этих условиях раствор становится минимально пересыщенным, что приводит к её равномерному росту. В ходе синтеза оболочки из реакционной смеси осуществлялся отбор проб, для которых были проведены измерения спектров поглощения и люминесценции. Для определения толщины оболочки была произведена ПЭМ как исходных ядер, так и КТ CdSe/CdS.

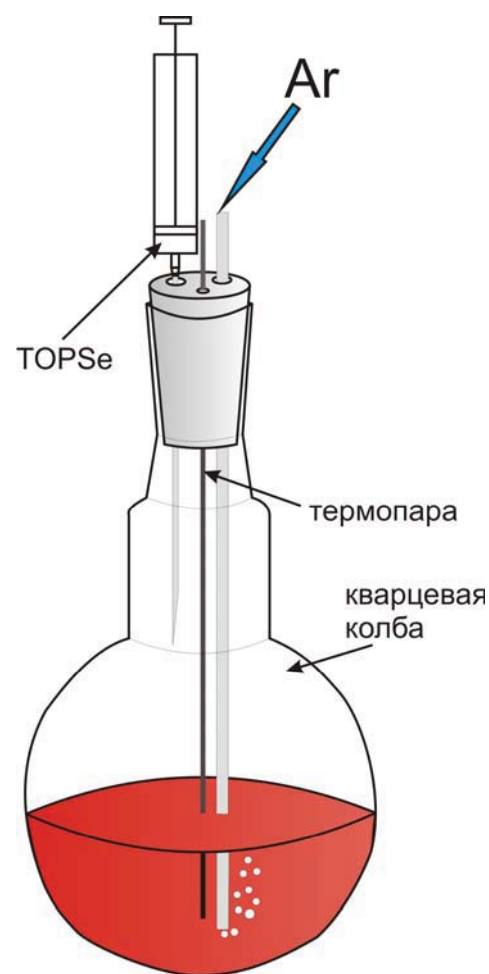


Рисунок 3. Синтез квантовых точек CdSe

В ходе работы синтезирован композит на основе КТ CdSe/CdS и ПММА. Синтез производился растворением коллоидных КТ в метилметакрилате с его дальнейшей полимеризацией. Было выполнено несколько синтезов с различными концентрациями КТ в мономере. В отличие от методик, описанных в литературе [4], модификация поверхности КТ перед введением в мономер не производилась. Распределение частиц в полученных композитах исследовано методом просвечивающей электронной микроскопии. В качестве образцов для съёмки использовались тонкие плёнки (срезы) синтезированных пластмасс.

## Обсуждение результатов

Ядра CdSe, выращенные при температуре 290 °С в течении 5 минут, имеют максимум люминесценции на длине волны 594 нм, первый максимум поглощения на длине волны 576 нм. Используя калибровочную зависимость, описанную в [2], оценён их размер - 3,7 нм. Покрытие этих ядер оболочкой CdS (количество прекурсоров такое же, как и при синтезе ядер) привело к незначительному (5 нм) сдвигу полос поглощения и люминесценции, однако визуально квантовая эффективность заметно возросла. Стоит отметить, что полуширина спектра люминесценции при этом уменьшилась с 45 до 30 нм, что свидетельствует об увеличении монодисперсности образца.

В следующем синтезе нанокристаллы CdSe были выращены при более низкой

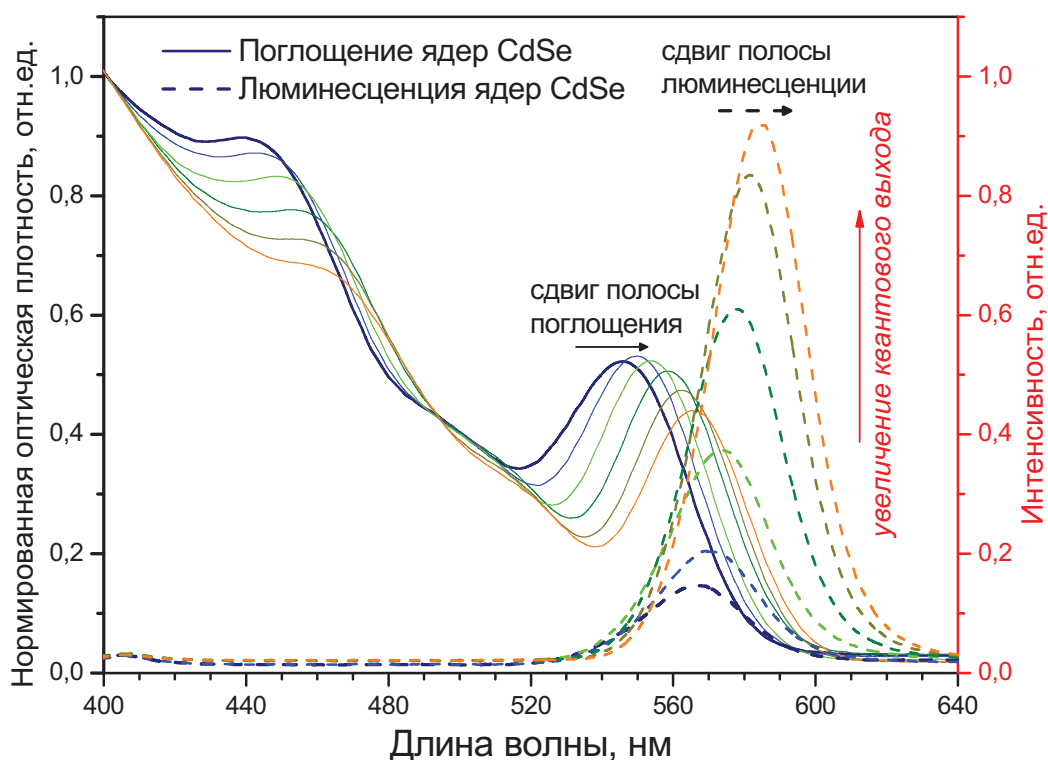
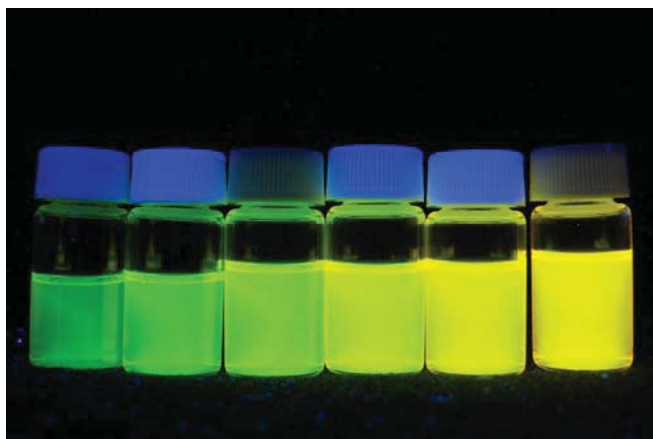


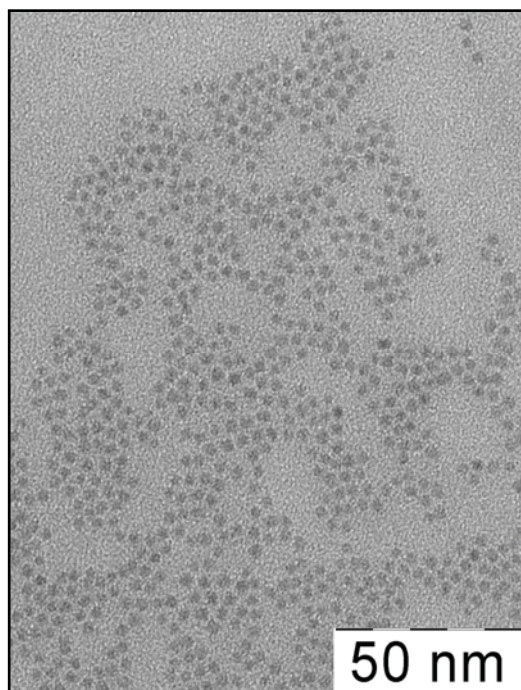
Рисунок 4. Спектры поглощения и люминесценции образцов, полученных при синтезе оболочки CdS на ядрах CdSe (Серия 1).



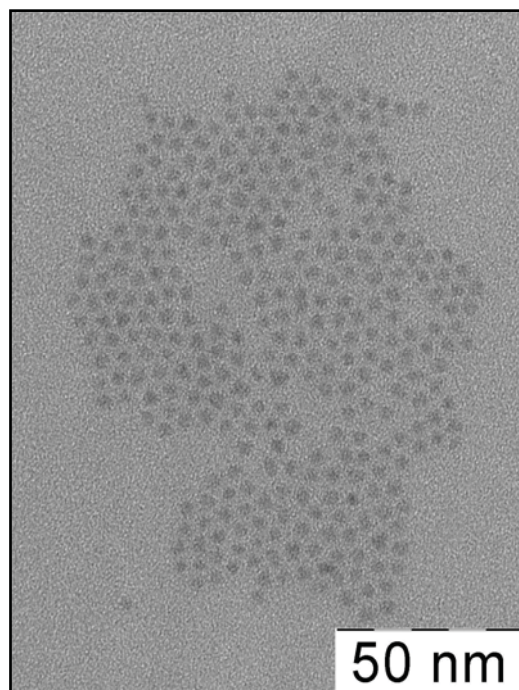
**Рисунок 5. Золи квантовых точек в гексане (Серия 1). Подсветка УФ-излучением.**

одинаковой оптической плотности на длине волны возбуждения (405 нм), съёмка производилась в одинаковой геометрии. Это позволило оценить изменение квантового выхода в серии (в 6 раз). Спектры поглощения нормированы на оптическую плотность в коротковолновой области (400 нм). Такая нормировка соответствует равенству количества вещества во всех образцах, при этом уменьшение относительной интенсивности первого экситонного максимума свидетельствует об увеличении количества атомов в частице. Как и в предыдущем эксперименте, с ростом оболочки происходит сужение полос поглощения и люминесценции. Данные просвечивающей электронной микроскопии (Рис.6, 7) позволили оценить толщину слоя CdS на ядрах CdSe: она составила 0.4 нм, что соответствует ~1 монослою.

температуре  $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ , также в течении 5 мин. По сравнению с ядрами, выращенными при  $290\text{ }^{\circ}\text{C}$  полосы поглощения и эмиссии сдвинуты в синюю область на 30 нм. В ходе роста оболочки на этих ядрах осуществлялся пробоотбор (*Серия 1*) с целью контроля спектральных характеристик КТ (Рис. 4). На графике виден заметный сдвиг (20 нм) полос поглощения и эмиссии. При измерении люминесценции образцы были разбавлены до



**Рисунок 6. Квантовые точки CdSe. Средний диаметр частиц 3 нм.**



**Рисунок 7. Квантовые точки CdSe/CdS. Средний диаметр частиц 3,8 нм.**

Задачей нового эксперимента стало измерение коэффициента экстинкции ( $\epsilon$ ) для КТ CdSe/CdS. Равенство количества частиц в пробах (*Серия 2*) достигалось взятием равных аликвот из реакционной смеси. Значение  $\epsilon$  для ядер CdSe рассчитано по данным спектрофотометрии исходя из зависимостей, приведённых в [2]. Результаты спектрофотометрии проб представлены на рисунке 8. Из этих данных следует, что коэффициент экстинкции в области высоких энергий излучения линейно возрастает с количеством добавленного прекурсора (TOPS) (Рис.9). Для этой серии измерены спектры люминесценции (Рис. 10), съёмка производилась в одинаковой геометрии при одинаковой оптической плотности образцов на длине волны возбуждения. Как и в предыдущем эксперименте, при малых значениях толщины оболочки квантовый выход увеличивался. Однако после достижения некоторого максимального значения, он начинал уменьшаться, что согласуется с литературными данными. При этом длины волн максимума люминесценции и первого экситонного максимума выходили на насыщение (570 и 583 нм соответственно).

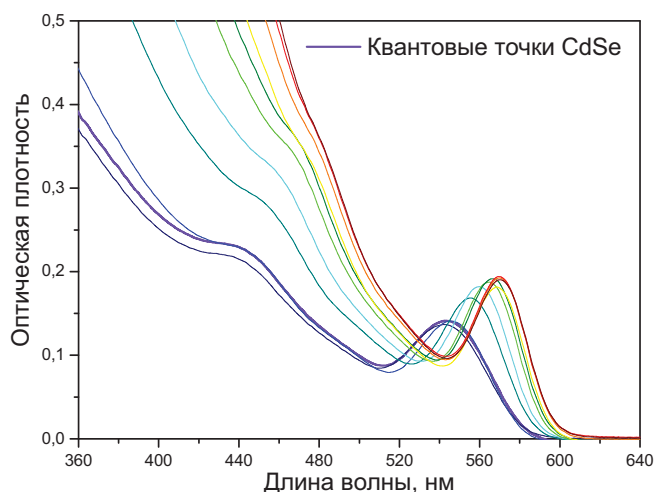


Рисунок 8. Спектры поглощения проб, взятых в ходе роста оболочки (*Серия 2*).

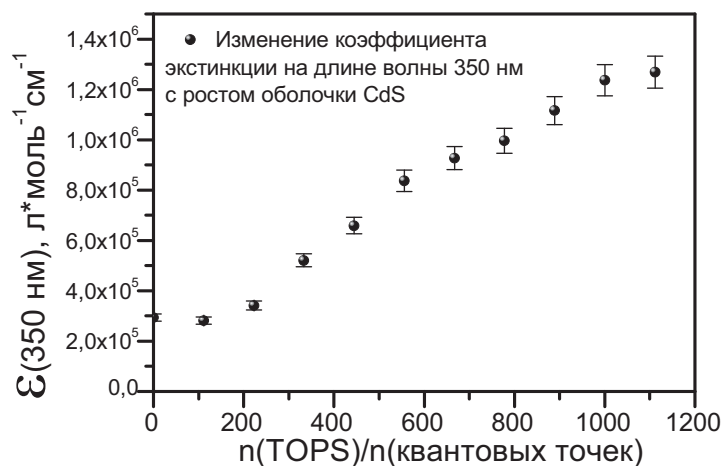


Рисунок 9. Изменение коэффициента экстинкции в коротковолновой области (*Серия 2*).

Синтезированы два образца композита КТ CdSe/CdS – ПММА с относительными концентрациями КТ, различающимися в 4 раза (меньшая концентрация имеет порядок  $\sim 1 \cdot 10^{-6}$  моль наночастиц/л, что соответствует  $\sim 0.001$  объёмным %). Образец с меньшей концентрацией КТ (Рис. 11) получился оптически прозрачным, образец с большей концентрацией нанокристаллов обладает видимым светорассеянием. По спектральным характеристикам прозрачный образец мало отличается от растворов исходных КТ в гексане (Рис.12). Данные просвечивающей электронной микроскопии свидетельствуют о том, что при описанном методе синтеза наночастицы CdSe/CdS собираются в агломераты (Рис.13),

заполняющими матрицу ПММА. При этом размер агломератов увеличивается с ростом концентрации. Оба образца обладают видимой люминесценцией.

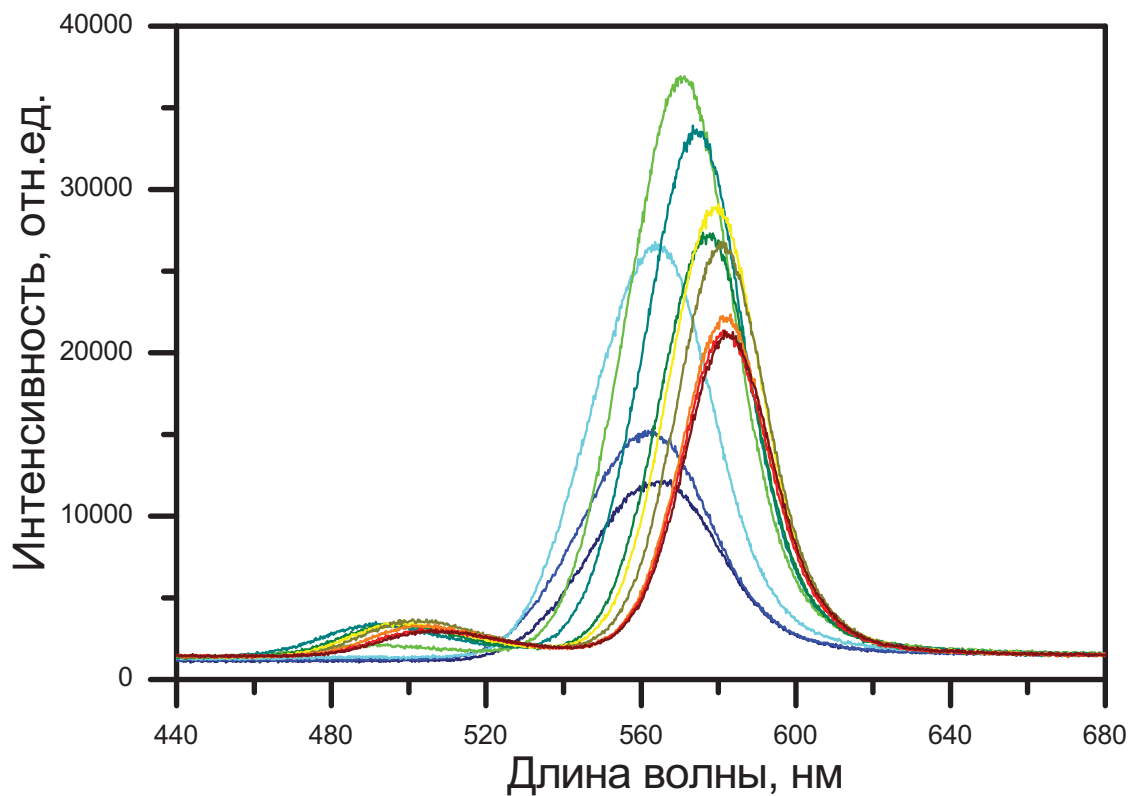


Рисунок 10. Спектры люминесценции проб, взятых в ходе роста оболочки (Серия 2).



Рисунок 11. Композит КТ CdSe/CdS – ПММА при дневном свете (слева) и с подсветкой УФ-излучением (справа)

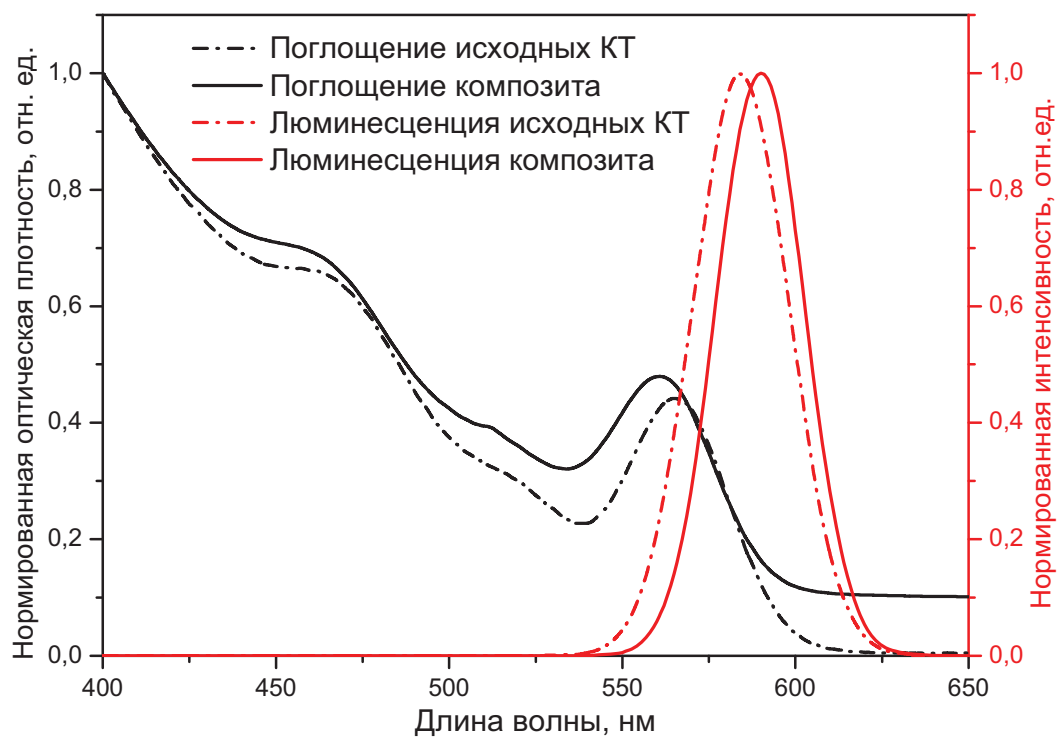


Рисунок 12. Спектры поглощения и люминесценции исходных квантовых и полученного прозрачного композита

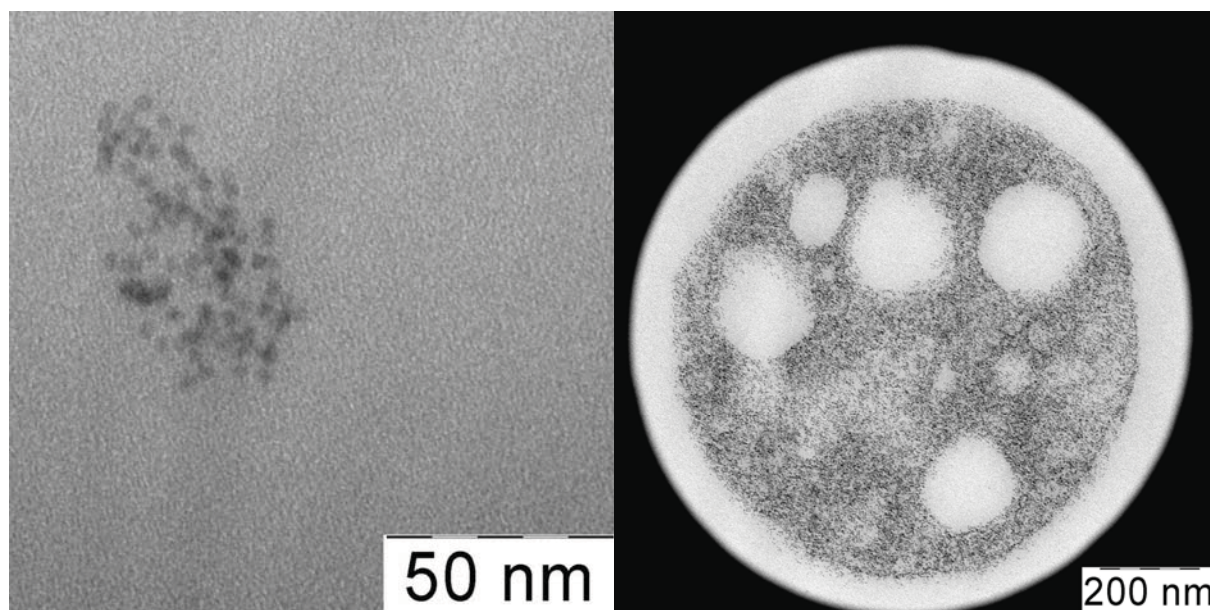


Рисунок 13. Агломераты квантовых точек CdSe/CdS в ПММА. В образце справа концентрация КТ в 4 раза больше, чем в образце слева.

## Выводы

1. При наращивании оболочки CdS толщиной **0,4 нм** на ядрах CdSe диаметром **3 нм**:
  - квантовый выход люминесценции увеличивается в **6 раз**
  - полосы поглощения и люминесценции сдвигаются на **20 нм** в красную область.
2. Определена зависимость коэффициента экстинкции КТ от количества добавленного TOPS при росте оболочки.
3. Синтезирован прозрачный люминесцирующий композит **КТ CdSe/CdS – ПММА**, по спектральным характеристикам близкий к исходным квантовым точкам.
4. При описанном в работе методе синтеза композита **КТ CdSe/CdS – ПММА** происходит агломерация частиц, размер агломератов увеличивается с ростом концентрации введённых в мономер квантовых точек.



## Список литературы

1. Yadong Yin, A. Paul Alivisatos **Colloidal nanocrystal synthesis and the organic–inorganic interface** // Nature 2005. V.437. P.664-670.
2. Yu W.W., Qu L., Guo W., Peng X. **Experimental Determination of the Extinction Coefficient of CdTe, CdSe, and CdS Nanocrystals** // Chem.Mater. 2003 V.15. №14. P.2854-2860.
3. B. O. Dabbousi, J. Rodriguez-Viejo, F. V. Mikulec, J. R. Heine, H. Mattoussi, R. Ober, K. F. Jensen, M. G. Bawendi **(CdSe)ZnS Core-Shell Quantum Dots: Synthesis and Characterization of a Size Series of Highly Luminescent Nanocrystallites** // J. Phys. Chem. B 1997 V. 101. P 9463-9475.
4. Li Chen, Jia Zhu, Qing Li, Su Chen, Yanru Wang **Controllable synthesis of functionalized CdS nanocrystals and CdS/PMMA nanocomposite hybrids** // European Polymer Journal 2007 V.43. P. 4593-4601.
5. Д.Н. Дирин **Синтез коллоидных квантовых точек CdTe и CdTe/CdSe** // Дипломная работа, Москва 2008.
6. П.Н. Танаев **Синтез и исследование коллоидных квантовых точек CdSe, стабилизированных олеиновой кислотой** // Дипломная работа, Москва 2006.
7. D. E. Fogg, L. H. Radzilowski, B. O. Dabbousi, R. R. Schrock, E. L. Thomas, M. G. Bawendi **Fabrication of Quantum Dot-Polymer Composites: Semiconductor Nanoclusters in Dual-Function Polymer Matrices with Electron-Transporting and Cluster-Passivating Properties** // Macromolecules 1997 V. 30 P. 8433-8439.
8. C. A. Leatherdale, W.-K. Woo, F. V. Mikulec, M. G. Bawendi **On the Absorption Cross Section of CdSe Nanocrystal Quantum Dots** // J. Phys. Chem. B 2002 V. 106 P. 7619-7622.

## Приложение

Микрофотографии композита КТ CdSe/CdS – ПММА с большей концентрацией частиц. Объектом съёмки является тонкая плёнка (срез) полученного образца.

