

# Оптические свойства коллоидных нанокристаллов ядро/оболочка CdTe/CdS на основе тетраподов.

Соколикова М. С.  
студентка III курса ФНМ

Руководители: доц., к. х. н. Васильев Р.Б., асп. Дишин Д.Н.

## **Аннотация.**

Свойства полупроводниковых нанокристаллов (квантовых точек, КТ) резко отличаются от свойств объемного материала того же состава. В КТ наблюдается квантово-размерный эффект, выражающийся в зависимости электронных и оптических свойств от линейных размеров объекта. Квантовые точки могут найти применение в оптоэлектронных системах, таких как светоизлучающие диоды, полупроводниковые лазеры, ячейки солнечных батарей, а также в качестве биологических меток.

На сегодняшний день нанокристаллы типа ядро/оболочка исследованы в меньшей степени, чем однокомпонентные квантовые точки, однако вызывают значительно больший практический интерес. Одна из важнейших особенностей таких гетероструктур – возможность пространственного разделения носителей заряда между материалами ядра и оболочки.

Нанокристаллы на основе тетраподов CdTe с лучами, покрытыми оболочкой CdS, обладают сложной электронной структурой. Эти объекты можно рассматривать как системы из четырех слабо связанных потенциальных ям. В каждой яме может быть локализована пара носителей заряда. Данный подход может стать основой для создания 4-х кубитного квантового компьютера. Актуальной задачей представляется определение коэффициентов экстинкции таких наногетероструктур.

В настоящей работе впервые синтезированы коллоидные нанокристаллы CdTe/CdS с формой тетрапода. Целью работы был синтез и исследование оптических свойств этих объектов, а так же экспериментальное измерение коэффициентов экстинкции на 400 нм для этих гетероструктур.

Нанокристаллы ядро/оболочка получали на основе тетраподов CdTe. Медленное добавление кадмиевого и сульфидного прекурсоров (0,12 ммоль/час) приводило к эпитаксиальному росту оболочки на поверхности имеющихся ядер и позволяло подавить нуклеацию CdS.

По данным просвечивающей электронной микроскопии длина лучей исходных тетраподов составила  $10,2 \pm 1,5$  нм, а толщина –  $3,7 \pm 0,5$ . Толщина наращенной оболочки достигает  $7 \text{ \AA}$ .

Синтезированные КТ исследованы методами спектроскопии поглощения и люминесценции в видимой и ближней ИК-области. Исследование спектров поглощения образцов CdTe/CdS в ходе роста оболочки CdS показало монотонное падение интенсивности  $1S_e-1S_h$  полосы поглощения, связанное с разделением носителей заряда. Анализ изменения профиля полос люминесценции в ходе роста оболочки CdS обнаружил возникновение второй полосы люминесценции в диапазоне длин волн от 785 до 830 нм, что может быть связано с переходом «Тип I – Тип II». Для первой полосы люминесценции наблюдается монотонный сдвиг в красную область почти на 65 нм, для второй – на 45 нм.

Из данных оптической спектроскопии поглощения получена линейная зависимость коэффициента экстинкции на 400 нм для гетероструктур CdTe/CdS от количества добавленного CdS. При осаждении на поверхности тетраподов 0,5 ммоль CdS коэффициент экстинкции достигает  $1,3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-1} \text{ M}^{-1}$  (коэффициент экстинкции ядер CdTe  $7,4 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1} \text{ M}^{-1}$ ).

## **Информация об участнике**

1. Соколикowa Мария Сергеевна
2. Факультет Наук о Материалах МГУ им. М.В.Ломоносова
3. III курс
4. Руководители: доц., к.х.н. Васильев Р.Б., асп. Дирин Д.Н.
5. Награды и публикации
  - 5.1 Конференция молодых ученых «Ломоносов» 2009 г. - 1 место (2 курс);
  - 5.2 XIX конкурс студентов-химиков им. Д.И. Менделеева (2009 г.) – диплом 2-ой степени.
  - 5.3 Roman B. Vasiliev, Dmitry N. Dirin, Maria S. Sokolikova, Sergey G. Dorofeev, Alexei G. Vitukhnovsky, and Alexander M. Gaskov, Growth of near-IR luminescent colloidal CdTe/CdS nanoheterostructures based on CdTe tetrapods // Mendeleev Communication (2008)

## **Отзыв научного руководителя**

на работу Соколиковой М. С. “Оптические свойства коллоидных нанокристаллов ядро/оболочка CdTe/CdS на основе тетраподов”  
представляемую на премию им. чл.-корр РАН Н.Н.Олейникова

Работа Соколиковой М.С. 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. Соколикова М.С. успешно работает в лаборатории с 1 курса. За время работы она освоила 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 Соколиковой М.С. посвящена исследованию нового класса наноматериалов – коллоидных наногетероструктур на основе полупроводниковых нанокристаллов. В работе синтезированы и исследованы коллоидные наногетероструктуры CdTe/CdS с формой тетрапода. Личный вклад Соколиковой М.С. в работу состоял в синтезе объектов, исследовании их оптических свойств и обработке экспериментальных результатов. Полученные Соколиковой М.С. новые экспериментальные данные представляют несомненный научный интерес. Часть результатов данной работы включена в опубликованную статью в журнале *Mendeleev Communication*, в которой Соколикова М.С. является соавтором.

Считаю, что работа Соколиковой М.С. 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.

## **Оптические свойства коллоидных нанокристаллов ядро/оболочка CdTe/CdS на основе тетраподов.**

### **Введение.**

При переходе к размерам, всего на один-два порядка большим атомарных, резко меняется весь спектр физико-химических характеристик вещества, могут появиться новые, неприсущие объемному материалу, свойства. В полупроводниковых нанокристаллах движение носителей заряда ограничено во всех трех измерениях, таким образом, электрон и дырка оказываются локализованы в трехмерной потенциальной яме. Такой объект и называется квантовой точкой.

Зависимость энергетического спектра от размера частицы и возможность существования квантовых точек в виде золь открывают огромные возможности для их практического использования. Квантовые точки могут найти применение в оптоэлектронных системах, таких как светоизлучающие диоды, полупроводниковые лазеры и ячейки фотоэлектрических преобразователей. Заманчива идея использовать в качестве биологических маркеров квантовые точки с люминесценцией в ближней ИК-области, в которой нет эффективных люминофоров на основе органических красителей.

На сегодняшний день достаточно хорошо исследованы однокомпонентные квантовые точки. Однако больший практический интерес вызывают коллоидные нанокристаллы типа ядро/оболочка. Важнейшая особенность таких гетероструктур – возможность пространственного разделения носителей заряда между материалами ядра и оболочки.

Методы коллоидной химии позволяют синтезировать полупроводниковые наночастицы разветвленной формы – тетраподы. Квантовые точки ядро/оболочка на основе тетраподов обладают сложной электронной структурой. Анизотропные наногетероструктуры обладают гигантскими коэффициентами экстинкции, что делает их перспективными материалами для ячеек солнечных батарей. С другой стороны, эти объекты можно рассматривать как системы из четырех слабо связанных потенциальных ям. В каждой яме может быть локализована пара носителей заряда. Данный подход может стать основой для создания 4-хкubitного квантового компьютера.

В рамках данной работы проведено исследование эволюции оптических свойств коллоидных нанокристаллов CdTe/CdS на основе тетраподов CdTe с ростом оболочки CdS. Экспериментально определены коэффициенты экстинкции полученных наногетероструктур.

### **Обзор литературы.**

#### **1. Квантовые точки типа ядро/оболочка.**

Полупроводниковые гетероструктуры вызывают все возрастающий интерес у исследователей в области химии и физики твердого тела. Объемные гетероструктуры уже нашли применение в качестве светоизлучающих диодов, лазеров, транзисторов и других элементов микро- и оптоэлектроники. Актуальной задачей сегодняшнего дня становится создание полупроводниковых гетероструктур нанометровых размеров. Главную роль в решении поставленной задачи могут сыграть коллоидные квантовые точки.

Методы коллоидной химии позволяют синтезировать многокомпонентные квантовые точки из полупроводников с различными характеристиками, в первую очередь с различной шириной запрещенной зоны. Особое место в этой группе занимают квантовые точки типа ядро/оболочка, состоящие из ядра одного полупроводника, покрытого оболочкой другого.

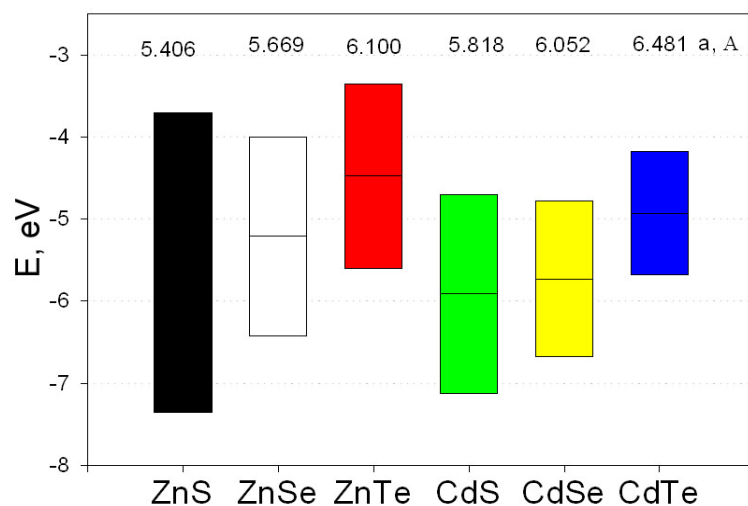
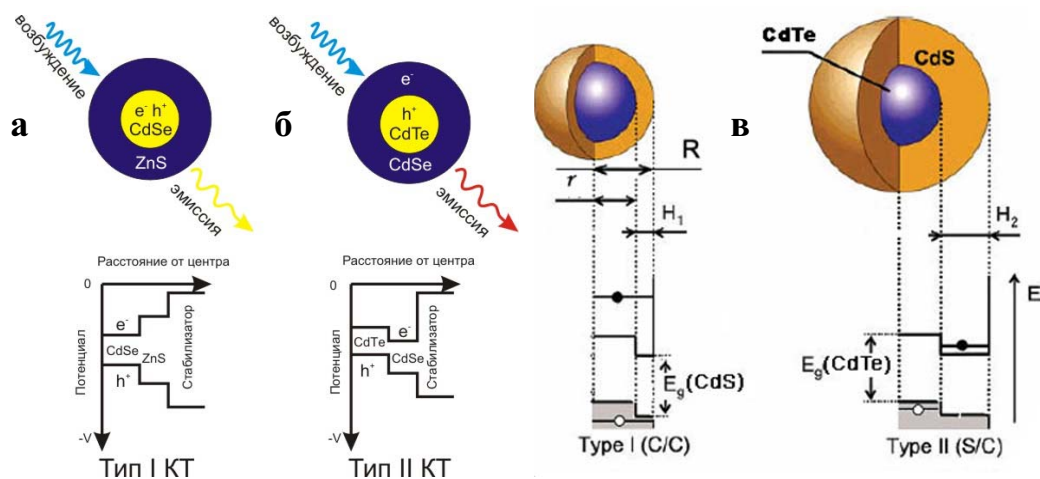


Рисунок 1. Сопоставление положения краев зон для некоторых полупроводниковых материалов, а также их параметры кристаллической решетки.  $E_v$  и  $E_c$  – края валентной зоны и зоны проводимости соответственно

Для коллоидных квантовых точек типа ядро/оболочка в зависимости от соотношения ширины запрещенных зон полупроводников и положения краев зон проводимости (рис. 1) и валентных зон могут наблюдаться разные типы локализации носителей заряда. Обычно выделяют 2 типа квантовых точек ядро/оболочка:

- **Тип I.** Широкозонный полупроводник является оболочкой, узкозонный – ядром. При этом нижний край зоны проводимости материала оболочки расположен выше по энергии, чем у материала ядра, а верхний край валентной зоны – ниже (рис.2 а). Более широкозонный полупроводник выполняет роль пассиватора поверхностных состояний и локализует электрон-дырочную пару внутри ядра. Данный подход используется для увеличения эффективности люминесценции.

- **Тип II.** Запрещенные зоны полупроводников расположены таким образом, что энергетически выгодным оказывается пространственное разделение носителей заряда. Такая ситуация возможна в двух случаях: ширины запрещенных зон полупроводников сопоставимы, однако края зон сдвинуты друг относительно друга (рис.2 б) [1]; ширина запрещенной зоны материала оболочки меньше, чем ядра, однако толщина оболочки такова, что в нее переходит только один носитель заряда (как правило это более легкий электрон) (рис.2 в) [2, 3]. Квантовые точки ядро/оболочка типа II могут быть интересны для создания систем с большим временем жизни фотовозбужденной электрон-дырочной пары. Другим эффектом является уменьшение эффективной ширины запрещенной зоны (ширина запрещенной зоны определяется разностью энергий края зоны проводимости материала оболочки и края валентной зоны материала ядра) и смещение максимума люминесценции в красную область.



**Рисунок 2. Пример квантовых точек ядро/оболочка с гетеропереходом типа I (а) и типа II (б) и (в).**

Покрывание квантовых точек слоями более широкозонного полупроводника (КТ типа I), как правило, приводит к значительному (до 10 раз) увеличению эффективности фотолюминесценции по сравнению с исходными квантовыми точками, покрытыми лишь слоем органического стабилизатора.

Увеличение интенсивности фотолюминесценции в нанокристаллах ядро/оболочка типа I связано с уменьшением вероятности нахождения около поверхности и захвата электрона и дырки на оборванные связи, присутствующие на поверхности наночастицы. Эффект локализации носителей заряда в ядре имеет место в случае, когда ширина запрещенной зоны материала оболочки больше чем, у материала ядра, как например у CdSe/ZnS или CdSe/CdS.

Иначе обстоит дело с КТ типа II. Как уже было сказано выше, в таких гетероструктурах энергетически выгодным оказывается пространственное разделение носителей заряда. Это выражается в уменьшении вероятности образования электрон-дырочной пары. В спектрах оптического поглощения это проявляется в падении интенсивности первого максимума поглощения. Другим следствием пространственного разделения носителей заряда является падение вероятности их рекомбинации, т.е. время жизни фотовозбужденной пары электрон-дырка в КТ типа II увеличивается по сравнению с КТ типа I.

## **2. Синтез коллоидных нанокристаллов типа ядро/оболочка.**

Одним из методов получения квантовых точек типа ядро/оболочка является SILAR (Successive Ion Layer Adsorption and Reaction). По своей сути этот метод сводится к послойному наращиванию оболочки. Развитие метода SILAR для синтеза квантовых точек типа II обусловлено двумя причинами: во-первых, это возможность заменить высокотоксичные и взрывоопасные металлорганические прекурсоры на более стабильные, а во-вторых, это необходимость разработки контролируемого метода наращивания оболочки, позволяющего получать частицы с узким распределением по размеру.

Сам метод заключается в наращивании на поверхности нанокристаллов одного монослоя компонента материала оболочки. Так, например, в работе [4] в раствор квантовых точек CdTe, тщательно очищенный от других соединений Cd и Te, поочередно добавляют рассчитанное количество прекурсора Cd или S. После каждого такого добавления проводится длительный отжиг до полного наращивания всего заложенного количества прекурсора. Контроль за расходом прекурсора проводится с помощью оптической и фотолюминесцентной спектроскопии. Следующую порцию прекурсора (S или Cd) добавляют только после того, как в спектрах перестает наблюдаться красный сдвиг, обусловленный увеличением размера частиц.

Второй подход к синтезу квантовых точек типа ядро/оболочка не предполагает разделения роста анионных и катионных слоев во времени. Вместо этого создается такое пересыщение, при котором возможен эпитаксиальный рост оболочки на поверхности имеющихся зародышей, но невозможна нуклеация частиц самого материала оболочки.

В 1997 группой Bawendi была опубликована двухстадийная модификация этого метода, предусматривающая выделение, очистку и последующее редиспергирование

синтезированных наночастиц CdSe в гексане [5]. Разделение процесса получения нанокристаллов ядро/оболочка позволяет удалить остатки прекурсоров, непрореагировавшие при синтезе ядра. Второе важное преимущество синтеза в две стадии заключается в возможности характеристики используемых в качестве ядер нанокристаллов, определении их размера, квантового выхода фотолюминесценции, и т.д.

### Экспериментальная часть.

Наногетероструктуры CdTe/CdS получены на основе тетраподов CdTe наращиванием оболочки сульфида кадмия. Рост тетраподов CdTe осуществлялся в результате быстрой инъекции 1 М триоктилфосфин теллурида (TOPTe) в 0,1 М раствор олеата кадмия в октадецене. Мольные соотношения реагентов –  $[Cd]/[Te] = 1/1$ ,  $[Cd]/[\text{олеиновая кислота}] = 1/3$ , объем октадецена 5 мл. Рост тетраподов происходил в инертной атмосфере аргона в течение 5 минут при температурах 180-280°C. Тетраподы выделены из реакционной смеси осаждением ацетоном и растворены в гексане. Для синтеза нанокристаллов ядро/оболочка аликвоту тетраподов переносили в минимальное количество октадецена. Рост оболочки CdS велся при 220°C при последовательном прибавлении аликвот 1 М TOPS и 0,1 М раствора олеата кадмия в октадецене. Медленное добавление кадмиевого и сульфидного прекурсоров (0,1-0,12 ммоль/час) приводило к эпитаксиальному росту оболочки на поверхности имеющихся ядер и позволяло подавить нуклеацию CdS. Суммарное количество добавленного прекурсора 0,5 ммоль. В ходе эксперимента осуществлялся пробоотбор.

Размеры и морфологию полученных наночастиц определяли из данных просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе LEO912 AB OMEGA. Спектры поглощения сняты на спектрофотометре Varian Cary50. Определялись положение нижнего по энергии экситонного максимума и оптическая плотность на экситонном максимуме. Для уточнения положения экситонного максимума спектры поглощения дважды дифференцировались. Максимум люминесценции определялся из спектров люминесценции, снятых на спектрометре Ocean Optics 4000 с возбуждением синим светодиодом с длиной волны 460 нм.

### Обсуждение результатов.

На рисунке 3а представлена микрофотография тетраподов CdTe, использовавшихся в качестве ядер для наногетероструктур CdTe/CdS. По данным просвечивающей электронной микроскопии длина лучей исходных тетраподов составила  $10,2 \pm 1,5$  нм, а толщина –  $3,7 \pm 0,5$  нм. Как показали результаты просвечивающей микроскопии, рост оболочки приводил преимущественно к утолщению лучей тетраподов, в то время как их длина сохранялась неизменной. Оболочка распределена по длине луча тетрапода неравномерно. Большая часть выросшего CdS сосредоточена на боковой поверхности свободных концов тетраподов, что может быть связано со стерическими трудностями для подхода CdS к центру тетрапода. Толщина оболочки в самом широком месте, определенная из данных микроскопии, составляет 6 Å.



Рисунок 3. Микрофотографии наночастиц CdTe (а) и CdTe/CdS (б), полученные методом просвечивающей электронной микроскопии, (с) – схематическое изображение наногетероструктуры CdTe/CdS.

Исходные тетраподы CdTe имели выраженный экситонный максимум на 656 нм и люминесцировали на 680 нм (рис. 4). Люминесценция для конечных наногетероструктур наблюдалась в области 830 нм.

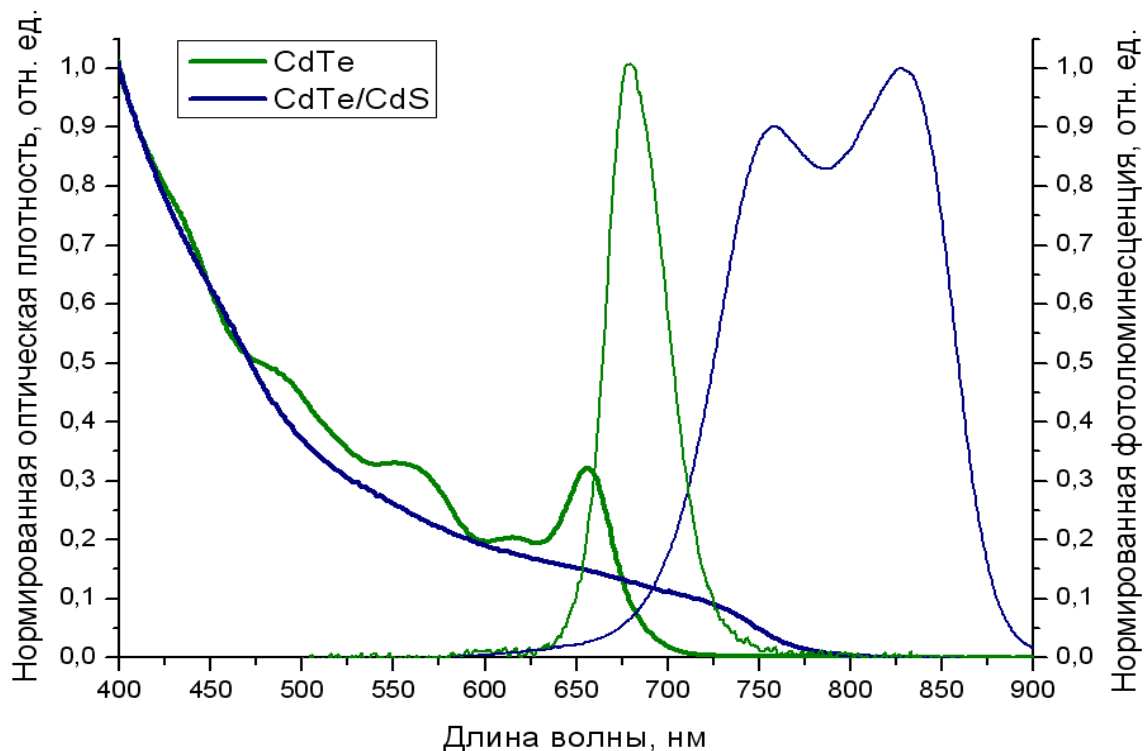


Рисунок 4. Спектры поглощения и люминесценции CdTe и CdTe/CdS.

Типичная модификация спектров поглощения и люминесценции в ходе роста оболочки для CdTe/CdS показана на рис.5. Рост оболочки приводит к монотонному сдвигу максимума поглощения  $\lambda(\text{abs})$  в красную область. Одновременно с этим уменьшается интенсивность поглощения вплоть до формирования практически бесструктурного хвоста аналогично сферическому случаю нанокристаллов типа II [6]. Падение интенсивности поглощения можно объяснить происходящим разделением носителей заряда между материалами ядра и оболочки и, следовательно, уменьшением вероятности образования электрон-дырочной пары. Максимум люминесценции  $\lambda(\text{lum})$  сдвигается в ИК-область на величину до 150 нм относительно исходных тетраподов CdTe.



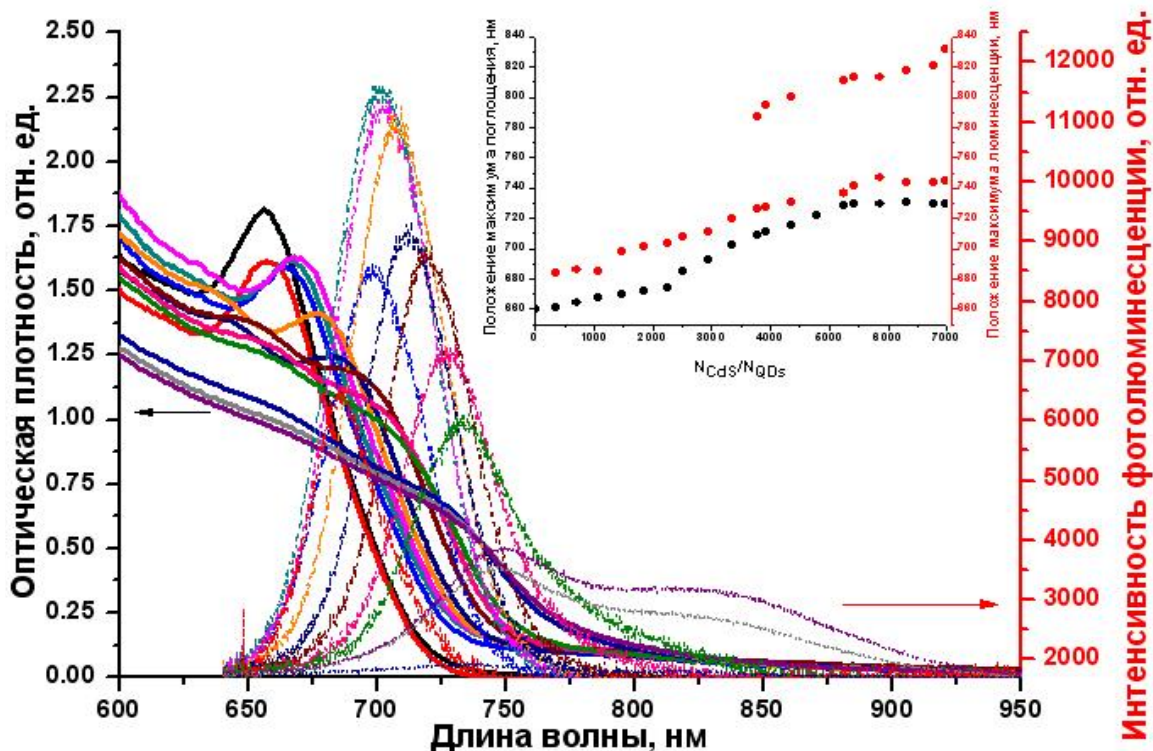


Рисунок 5. Эволюция спектров поглощения и фотолюминесценции с ростом оболочки CdS.

Анализ изменения профиля полос люминесценции в ходе роста оболочки CdS обнаружил уширение полос люминесценции при небольших толщинах оболочки и возникновение второго максимума люминесценции при дальнейшем наращивании CdS. Спектры люминесценции полученных наногетероструктур были описаны суперпозицией двух гауссовых распределений.

Спектр люминесценции исходных тетраподов описывается гауссовым распределением. Это же верно и для гетероструктур с небольшими толщинами оболочки. Однако уже когда число  $N_{CdS}/N_{QDs}$  добавленных формульных единиц CdS на один тетрапод CdTe достигает 3200-3600, в спектре люминесценции наблюдается уширение полос и последующее возникновение второй полосы люминесценции.

Возникновение второй полосы люминесценции может быть связано со сменой излучательного перехода. То есть, при определенных толщинах оболочки может происходить разделение носителей заряда между материалами ядра и оболочки (переход Тип I – Тип II).

По мере прибавления прекурсоров CdS интенсивность второй полосы относительно первой увеличивается (рис. 6а), что может объясняться увеличением вероятности перехода электрона в материал оболочки.

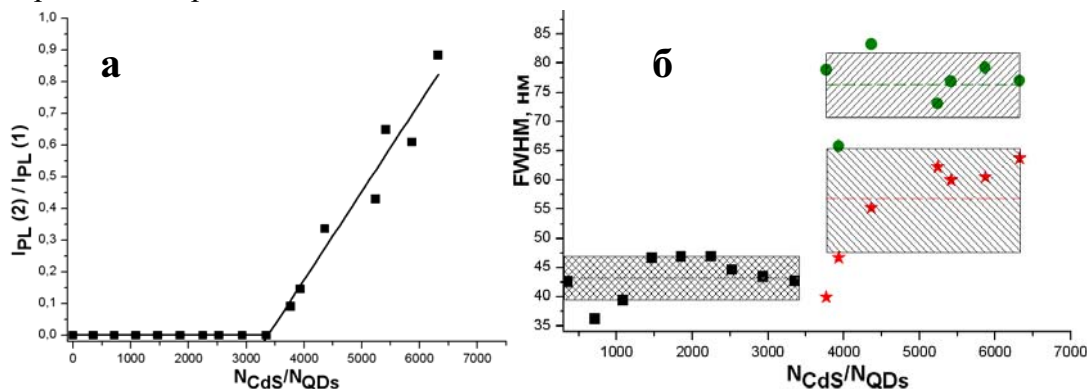


Рисунок 6. (а) – соотношение интенсивностей полос люминесценции, (б) – ширины полос люминесценции на половине высоты.

На рисунке 6б показано изменение ширины полос люминесценции на половине высоты с ростом оболочки CdS. Сначала для наногетероструктур наблюдается одна полоса люминесценции с характерной шириной на полувысоте  $43 \pm 4$  нм. Когда же  $N_{CdS}/N_{QDs}$  превышает 3600, возникает вторая полоса с полушириной  $79 \pm 8$  нм. Ширина первой полосы так же возрастает, но не превышает  $59 \pm 5$  нм.

Исходя из данных оптической спектроскопии, были определены коэффициенты экстинкции полученных гетероструктур. Коэффициент экстинкции на 400 нм с ростом оболочки увеличивается линейно (рис. 7а).

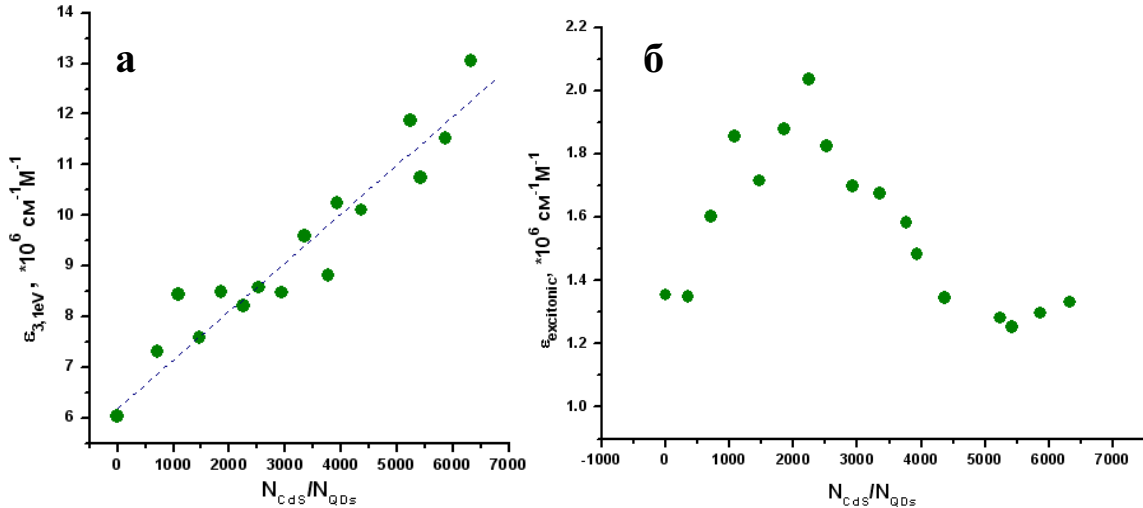


Рисунок 7. Коэффициент экстинкции на 400 нм (а) и экситонный коэффициент экстинкции (б) для гетероструктур CdTe/CdS.

Согласно [7] коэффициент экстинкции прямо пропорционален эффективному сечению захвата  $\sigma$ . Линейная зависимость  $\sigma$  от числа добавленных ионных пар CdS позволяет предположить аддитивность поглощения ионными парами CdTe и CdS

$$\varepsilon_{3.1eV} = \varepsilon_{3.1eV}^{CdTe} + \varepsilon_{3.1eV}^{CdS}, \quad (1)$$

и ввести эффективное сечение захвата  $\mu$  на одну ионную пару аналогично [7]:

$$\mu^i = \frac{\sigma^i}{N_{units/QD}^i}, \quad (2)$$

где  $i = CdTe, CdS$ ;  $N_{units/QD}$  – число ионных пар на одну квантовую точку. В рамках такого предположения коэффициент экстинкции на длине волны 400 нм  $\varepsilon_{3.1eV}$  для синтезированных наногетероструктур будет выражаться как:

$$\varepsilon_{3.1eV} = \sum_i \mu_{3.1eV}^i N_{units/QD}^i \frac{N_A}{2303}, \quad (3)$$

Согласно [7]  $\mu_{3.1eV}$  может быть напрямую рассчитано из оптических констант:

$$\mu_{3.1eV} = \frac{n_l}{n_{solv}} |F_{loc}|^2 \frac{\alpha_{3.1eV} V_{UC}}{z}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{3.1eV}$  – объемный коэффициент поглощения на 3.1 эВ ( $3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$  и  $1.5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$  для CdTe и CdS соответственно),  $V_{UC}$  – объем элементарной ячейки (CdTe:  $2.723 \cdot 10^{-22} \text{ см}^3$  для сфалерита и  $1.568 \cdot 10^{-22} \text{ см}^3$  для вюртцита [7]; CdS:  $1.971 \cdot 10^{-22} \text{ см}^3$  для сфалерита и  $0.994 \cdot 10^{-22} \text{ см}^3$  для вюртцита),  $z$  – число ионных пар в одной элементарной ячейке (4 для структуры сфалерита и 2 для структуры вюртцита),  $n_l$  и  $n_{solv}$  – действительная часть показателя преломления для полупроводника и растворителя соответственно (3.5 для CdTe, 2.6 для CdS и 1.4 для гексана),  $F_{loc}$  – фактор коррекции локального поля, равный

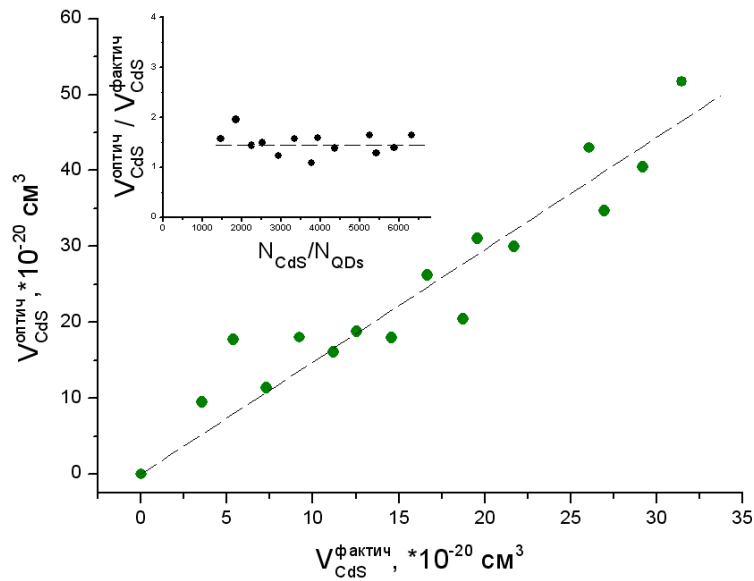
$$F_{loc} = \frac{3m_{solv}^2}{m_l^2 + 2m_{solv}^2}, \quad (5)$$

$m_l$  и  $m_{solv}$  – полный комплексный показатель преломления для полупроводника и растворителя соответственно (3.6 для CdTe, 3.1 для CdS и 1.4 для гексана).

Т.о. предположение аддитивности поглощения ионными парами CdTe и CdS позволяет получить аналитическое выражение, связывающее коэффициент экстинкции наногетероструктуры с объемом ядра и оболочки:

$$\varepsilon_{3.1eV} = \sum_i \frac{n_l^i}{n_{solv}} |F_{loc}^i|^2 \alpha_{3.1eV}^i V^i \frac{N_A}{2303}, \quad (6)$$

Измеренные коэффициенты экстинкции  $\varepsilon_{3.1eV}$  по формуле (6) были пересчитаны в объем  $V_{CdS}^{онтич}$  кристаллического CdS. Объем оболочки  $V_{CdS}^{онтич}$  пропорционален коэффициенту экстинкции  $\varepsilon_{3.1eV}$ , растет монотонно и линейно от объема добавленного прекурсора  $V_{CdS}^{фактич}$  (рис. 8). При этом отношение  $V_{CdS}^{онтич} / V_{CdS}^{фактич}$ , показанное на врезке к рис.8, должно характеризовать выход реакции. Зависимость  $V_{CdS}^{онтич} / V_{CdS}^{фактич}$  от  $N_{CdS} / N_{QDs}$  линейная, что говорит о постоянной скорости реакции в течение синтеза. Однако среднее значение  $V_{CdS}^{онтич} / V_{CdS}^{фактич}$  составило  $1.48 \pm 0.22$ .



**Рисунок 8.**

Для наногетероструктур завышенный выход реакции может объясняться тем, что фактор коррекции локального поля не может быть рассчитан по формуле (5).

На рисунке 7б представлена зависимость экситонного коэффициента экстинкции от числа  $N_{CdS} / N_{QDs}$ . Сначала  $\varepsilon_{excitonic}$  возрастает, что связано с увеличением сечения захвата с ростом частиц. Однако, начиная с  $N_{CdS} / N_{QDs}$  в 2500, наблюдается спадающая зависимость, которая объясняется тем, что экситонный коэффициент экстинкции пропорционален интегралу перекрытия волновых функций электрона и дырки  $\theta$  :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ex} &\sim \mu_{3.1eV} N_{units/QD} \theta \\ \varepsilon_{ex} / \varepsilon_{3.1eV} &\sim \theta \end{aligned}, \quad (7)$$

С увеличением толщины CdS увеличивается вероятность перехода электрона в материал оболочки, интеграл перекрытия волновых функций уменьшается.

### **Заключение.**

На основе тетраподов CdTe впервые синтезированы коллоидные наногетероструктуры CdTe/CdS с люминесценцией в ближнем ИК-диапазоне до 830 нм. При анализе профиля люминесцентных кривых обнаружено возникновение второй полосы люминесценции на длинах волн 750-790 нм, что может быть связано с переходом «Тип I - Тип II». Для первой полосы люминесценции наблюдается монотонный сдвиг в красную область почти на 65 нм, для второй – на 45 нм. Из экспериментальных данных определены коэффициенты

экстинкции. Установлена линейная зависимость коэффициента экстинкции на 400 нм для гетероструктур CdTe/CdS от количества введенного в систему CdS. При осаждении на поверхности тетраподов 0,5 ммоль CdS коэффициент экстинкции достигает  $1,3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-1} \text{ М}^{-1}$ .

### **Список литературы.**

1. Kim S., Fisher B., Eisler H.-J., Bawendi M. Type-II Quantum Dots: CdTe/CdSe(Core/Shell) and CdSe/ZnTe(Core/Shell) Heterostructures // J.Am.Chem.Soc. 2003. V.125. P.11466-11467.
2. Ivanov S.A., Nanda J., Piryatinski A., Achermann M., Balet L.P., Bezel I.V., Anikeeva P.O., Tretiak S., Klimov V.I. Light amplification using inverted core/shell nanocrystals: towards lasing in the single-exciton regime // J.Phys.Chem.B. 2004. V.108. №30. P.10625-10629.
3. Balet L.P., Ivanov S.A., Piryatinski A., Achermann M., Klimov V.I. Inverted Core/Shell Nanocrystals Continuously Tunable between Type-I and Type-II Localization Regimes // NanoLett. 2004. V.4. №8. P.1485-1488.
4. Li J.J., Tsay J.M., Michalet X., Weiss Sh. Wavefunction engineering: From quantum wells to near-infrared type-II colloidal quantum dots synthesized by layer-by-layer colloidal epitaxy // Chem.Phys. 2005. V.318. P.82-90.
5. Dabbousi B.O., Rodriguez-Viejo J., Mikulec F.V., Heine J.R., Mattoussi H., Ober R., Jensen K.F., Bawendi M.G. (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.
6. Kim, S.; Fisher, B.; Eisler, H.-J.; Bawendi, M., Type-II Quantum Dots: CdTe/CdSe(Core/Shell) and CdSe/ZnTe(Core/Shell) Heterostructures. J. Am. Chem. Soc. 2003; 125(38); 11466-11467.
7. Celso de Mello Donega, Rolf Koole, Size dependence of the spontaneous emission rate and absorption cross section of CdSe and CdTe quantum dots // J.Phys.Chem.C.