

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»
(СГУ)**

Кафедра физики полупроводников

**Исследование влияния формы полупроводниковых квантовых точек (InSb и
CdSe) на их энергетический спектр**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4052 группы

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

института физики

Бирюкова Ярослава Николаевича

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Кабанов В.Ф.

фамилия, инициалы

Зав. кафедрой физики

полупроводников:

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Михайлов А.И.

фамилия, инициалы

Саратов 2021

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика темы. Квантовая точка — полупроводниковый кристалл, носители заряда которого, имеют ограничение в пространстве по всем трём осям. Квантовая точка (КТ) должна обладать достаточно малыми размерами, чтобы стали проявляться квантово-размерные эффекты. Данное состояние достигается, если энергия электрона в квантовой точке заметно превосходит энергию тепловых колебаний $4kT$, что приблизительно составляет величину, равную 0,1 электрон вольт (эВ).

Спектр энергии квантовых точек является дискретным, а ширина запрещенной зоны, между соседствующими стационарными уровнями энергии носителей заряда, является зависимой от размера КТ как:

$$\frac{\hbar}{2 \cdot m^* \cdot d^2} \quad (1)$$

где: $\hbar$ — приведённая постоянная Планка;

d — характерный размер точки,

m^* — является эффективной массой носителей заряда.

Существуют два основных типа квантовых точек: эпитаксиальные и коллоидные квантовые точки.

Уникальные спектральные характеристики квантовых точек делают их перспективным материалом для применения в самых различных областях. В частности, ведутся разработки по использованию КТ в светоизлучающих диодах, дисплеях, лазерах, солнечных батареях.

Существующие методы позволяют оценить размер исследуемых объектов, их форму и состав, однако, они не позволяют оценить энергетический спектр КТ, который может быть источником полезной информации об оптических и электронных свойствах.

Целью данной работы является исследование влияния формы квантовой точки на её электронный спектр.

Для выполнения данной цели решались следующие **задачи**:

- 1 Анализ научной литературы по теме исследования.

2 Проведение ряда измерений для снятия спектральных и размерных характеристик КТ.

3 Проведение расчетов по собранным данным.

Актуальность темы. Выбор методов изучения свойств квантовых точек представляется важным вопросом. Одним из применяемых методов определения размеров КТ, является просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), метод динамического рассеяния света для анализа размера частиц, а также анализ оптических характеристик. Среди методов изучения синтезированных квантовых точек особое место занимают спектроскопические методики, поскольку внутри и межмолекулярные взаимодействия в квантовых точках, их ансамблях и композитах на основе квантовых точек будут приводить к изменению их спектрально-люминесцентных характеристик. В частности, наличие узкого пика в спектре люминесценции и его положение позволяет характеризовать экситонные возбуждения в исследуемых средах, дисперсия размеров нанокристаллов будет приводить к дополнительному уширению спектра люминесценции ансамбля квантовых точек; наличие дефектов в структуре квантовых точек приводит к появлению рекомбинационной полосы в спектре люминесценции ансамбля квантовых точек, к уменьшению эффективного квантового выхода, а также к наличию эффекта мерцания в спектрах одиночных квантовых точек.

Исследуемая структура. Исследуемая структура состоит из:

- квантовых точек селенида кадмия (CdSe), с характерными размерами 3-4 нм (Green) и 7-8 нм (Red).
- квантовых точек антимонида индия (InSb), с характерным размером 10-12 нм;

Оборудование и методика измерений.

В ходе выполнения работы было использовано следующее оборудование:

1. Malvern Zetasizer Nano (Malvern InstrumentsLtd, England) применялся для определения размера квантовых точек антимонида индия.

2. ИКС-22 применялся для снятия спектров поглощения квантовых точек антимолида индия и селенида кадмия.

В работе использовали следующие материалы: квантовые точки InSb и CdSe.

Эксперимент. Построение уровней энергетического спектра, используемых в данной работе, основано на методах, представленных в учебных пособиях [1-2]. При проведении экспериментов данный метод считался исходным. Для проведения опытов использовались квантовые точки антимолида индия и селенида кадмия.

На рисунке 1 представлены первые энергетические уровни квантовых точек CdSe, для двух случаев. Отсчет энергии для дырки ведется от уровня энергии потолка валентной зоны объемного материала, для электрона — от дна зоны проводимости. За условный 0 принят уровень энергии потолка валентной зоны объемного материала.

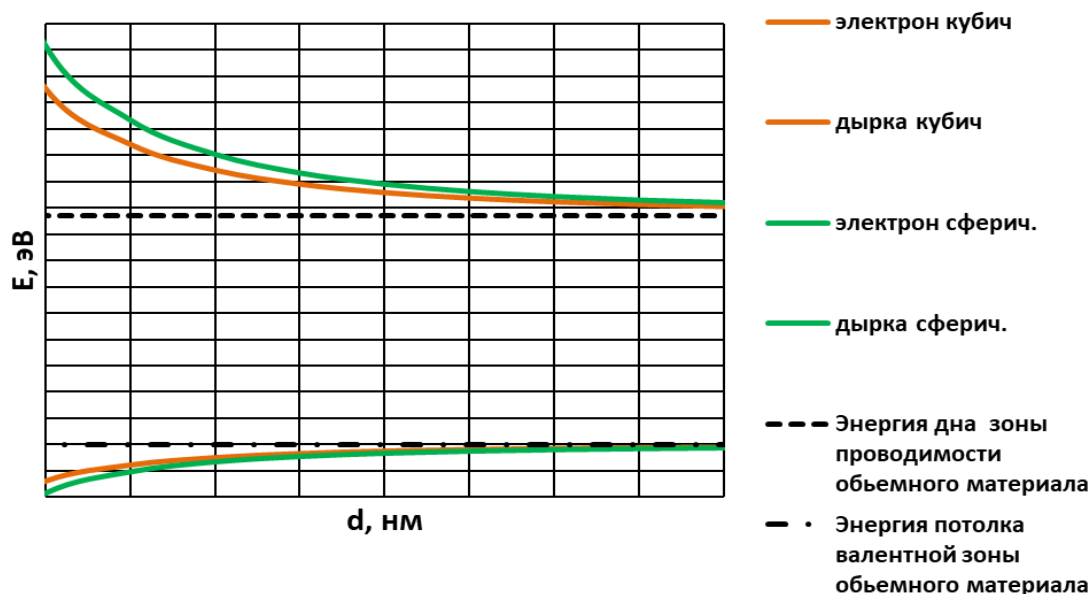


Рисунок 1 – Сравнение энергетических уровней квантовых точек CdSe двух различных моделей.

После построения графиков 1-го энергетического уровня для электрона и дырки CdSe (рисунок 1) для двух случаев: а) сферической и б) кубической модели, необходимых для определения энергии перехода в КТ, т.к. переход с 1-

го уровня электрона КТ на 1-й уровень дырки КТ соответствует максимуму на спектральной характеристике, необходимо сравнить полученные значения с экспериментальными данными положения максимумов на спектрах люминесценции. На рисунке 2 представлены максимумы люминесценции квантовых точек CdSe:

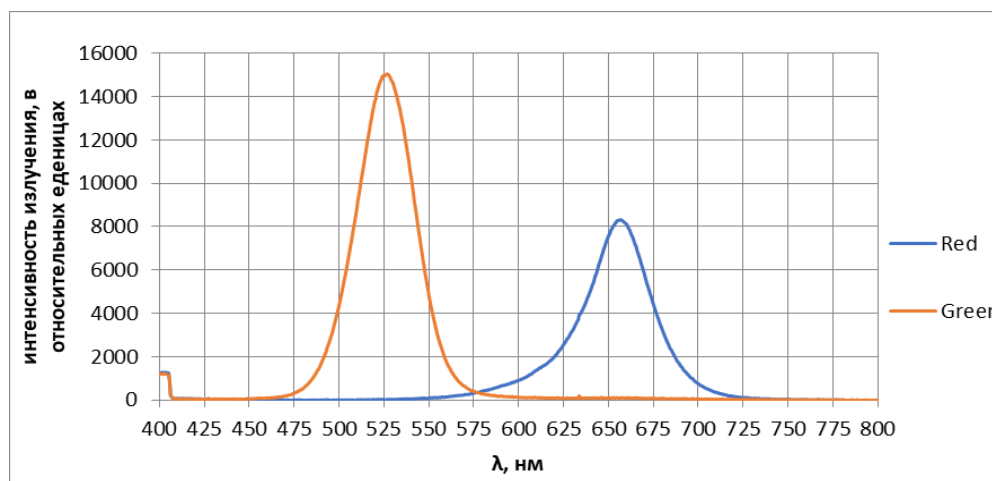


Рисунок 2 – Максимумы люминесценции квантовых точек CdSe характерных размеров 3-4 нм (Green) и 7-8 нм (Red).

Полученные данные рассматриваются с погрешностью приблизительно равной $1kT$, что соответствует некоторой полосе энергии. Пересечение этой полосой энергии кривых графика дает возможность, пересекая ось абсцисс, оценить характерные размеры для данных КТ (рисунок 3 и 4).

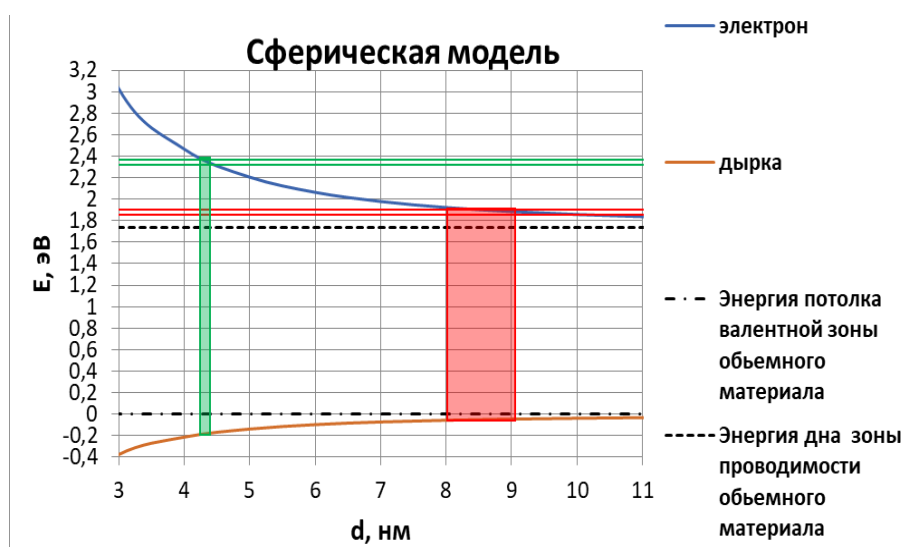
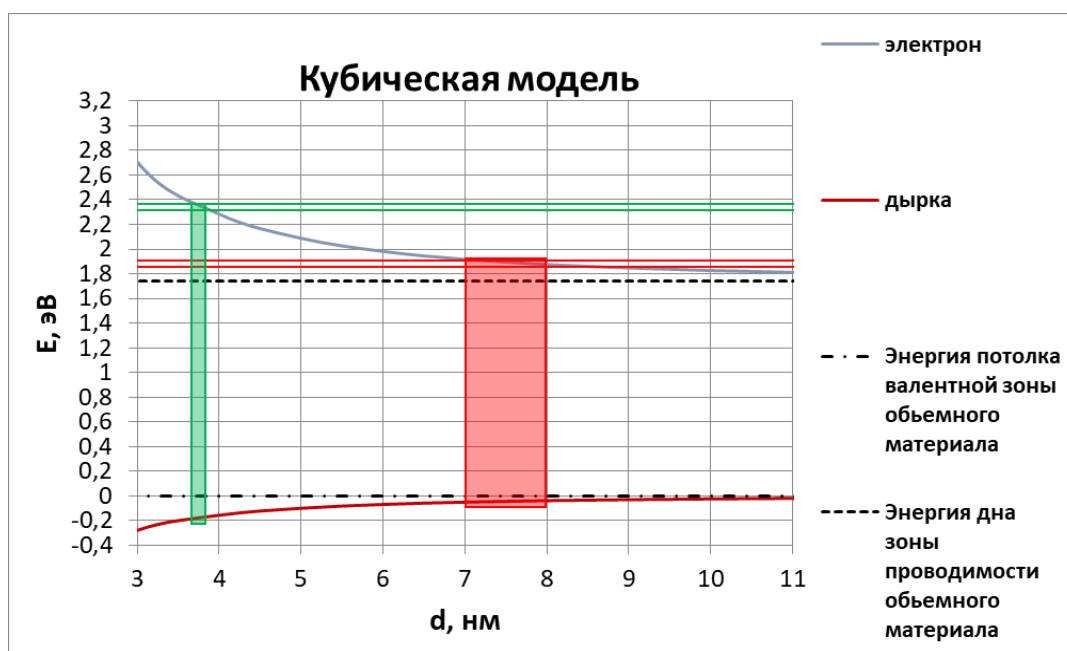


Рисунок 3 – Характерные размеры КТ CdSe разного спектра для сферической модели. Цветами обозначены спектры излучения КТ.



б)

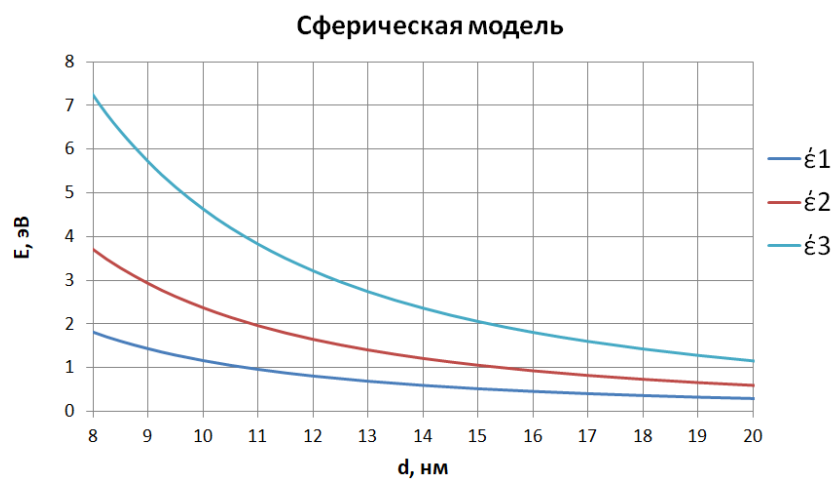
Рисунок 4 – Характерные размеры КТ CdSe разного спектра для кубической модели. Цветами обозначены спектры излучения КТ.

Имея данные о том, какой реальный размер имеют квантовые точки, 3-4 нм (Green) и 7-8 нм (Red) (спецификации производителя), по чьему спектру люминесценции (рисунок 2) проводились расчеты, можно проверить соответствие моделей реальным данным.

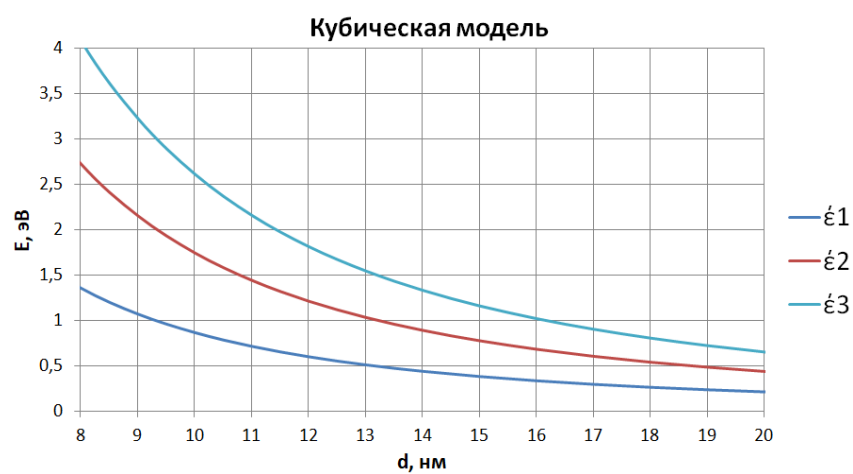
Сравнивая расчетные модели и реальные данные, было получено, что наибольшей достоверностью обладает модель кубической КТ, т. к. она дала наибольшее соответствие с реальными данными: 4 нм расчетные и 3-4 нм реальные (зеленый); 7-8 нм расчетные и 7-8 нм реальные (красный).

Сферическая модель дала результаты: 4,5 нм расчетные и 3-4 нм для зеленой; 8-9 нм расчетные и 7-8 нм реальные (красный).

По аналогии, для InSb после построения графика первых 3-х энергетических уровней для электрона, (рисунок 5), для двух случаев: а) сферической и б) кубической модели, необходимо сравнить полученные значения с экспериментальными данными положения максимумов на спектрах поглощения. Дырочный спектр не учитывается. За условный 0 принят уровень энергии дна зоны проводимости объемного материала.



а)



б)

Рисунок 5 – Первые 3 энергетических уровней квантовых точек InSb для двух случаев: а) сферической и б) кубической модели.

При сравнении первых энергетических уровней антимонида индия, построенных по 2-м разным моделям на рисунке 6, можно наглядно увидеть разницу между ними.

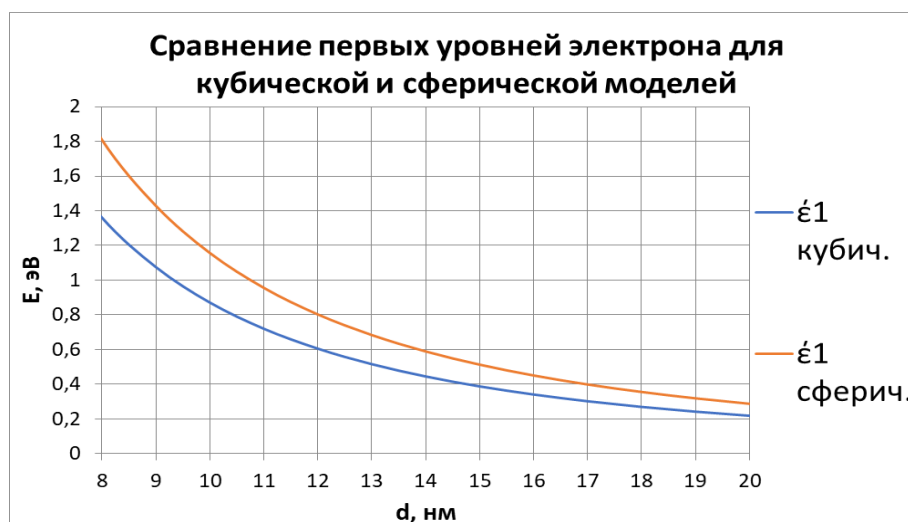


Рисунок 6— Сравнение первых уровней электрона для кубической и сферической моделей КТ InSb.

На рисунке 7 представлены максимумы поглощения квантовых точек InSb:

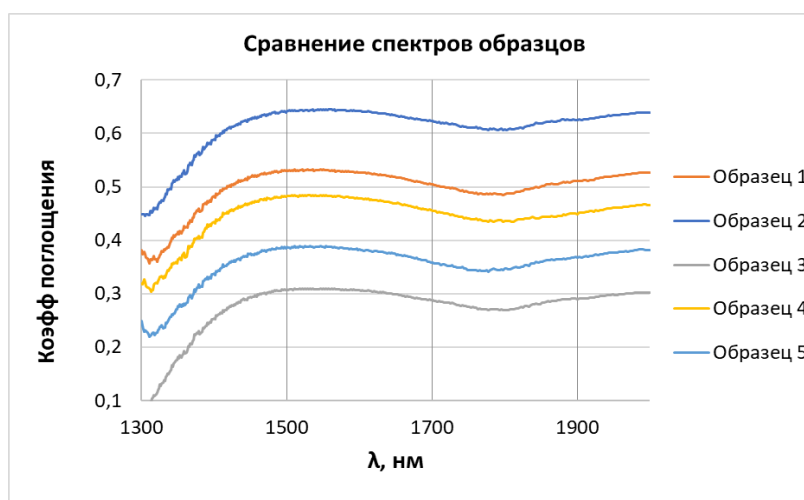
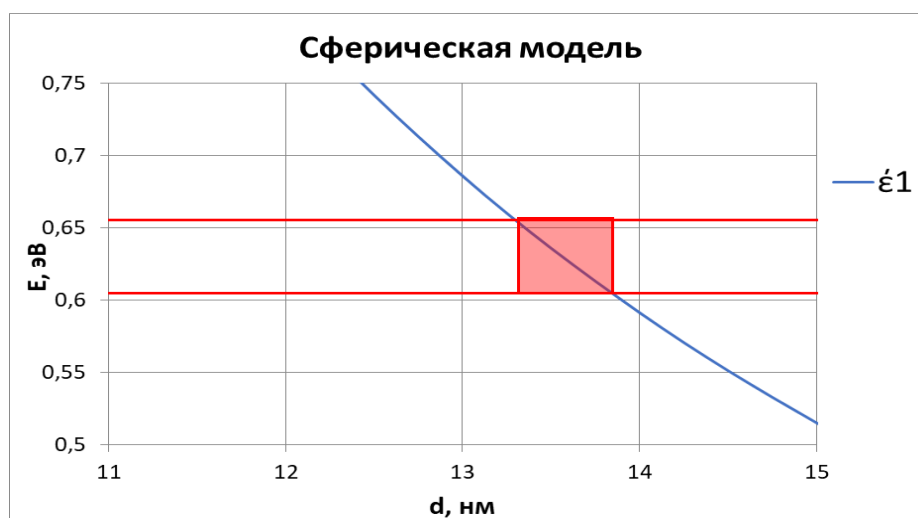


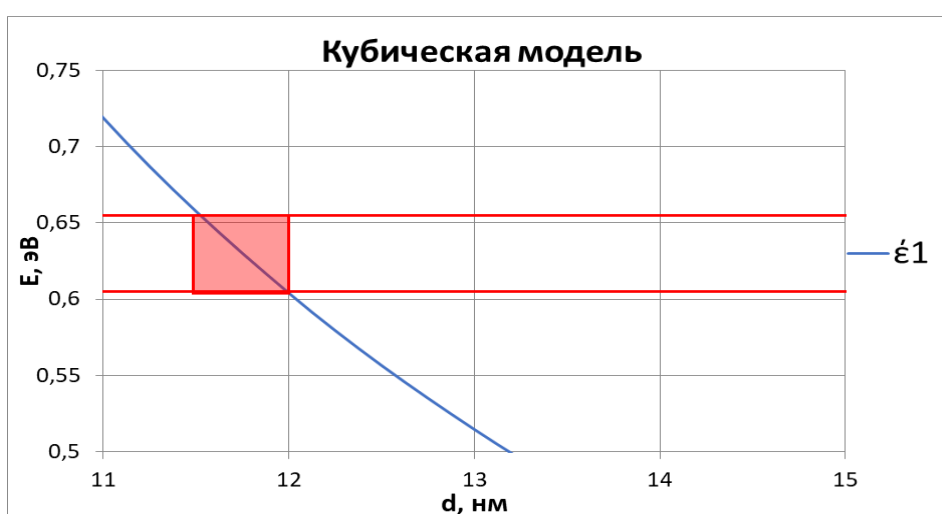
Рисунок 7 – Максимумы поглощения 5 образцов квантовых точек InSb.

Исходя из полученных максимумов, средняя длина волны максимума поглощения приходится на инфракрасный спектр, с длиной волны ≈ 1550 нм.

Полученные данные рассматриваются с погрешностью приблизительно равной **1кТ**, что соответствует некоторой полосе энергии. Пересечение этой полосой энергии кривых графика дает возможность, пересекая ось абсцисс, оценить характерные размеры для данных КТ (рисунок 8).



а)



б)

Рисунок 8 – Характерные размеры КТ InSb разного спектра для двух случаев: а) сферической и б) кубической модели.

Как видно из графиков, теоретически предсказанный размер кантовых точек антимонида индия составляет для кубической модели: 11-12 нм; для сферической модели: 13-14.

Реальные размеры квантовых точек InSb, снятых с помощью средств электронной микроскопии и приведенные на рисунке 8, в среднем составляют ≈ 12 нм.

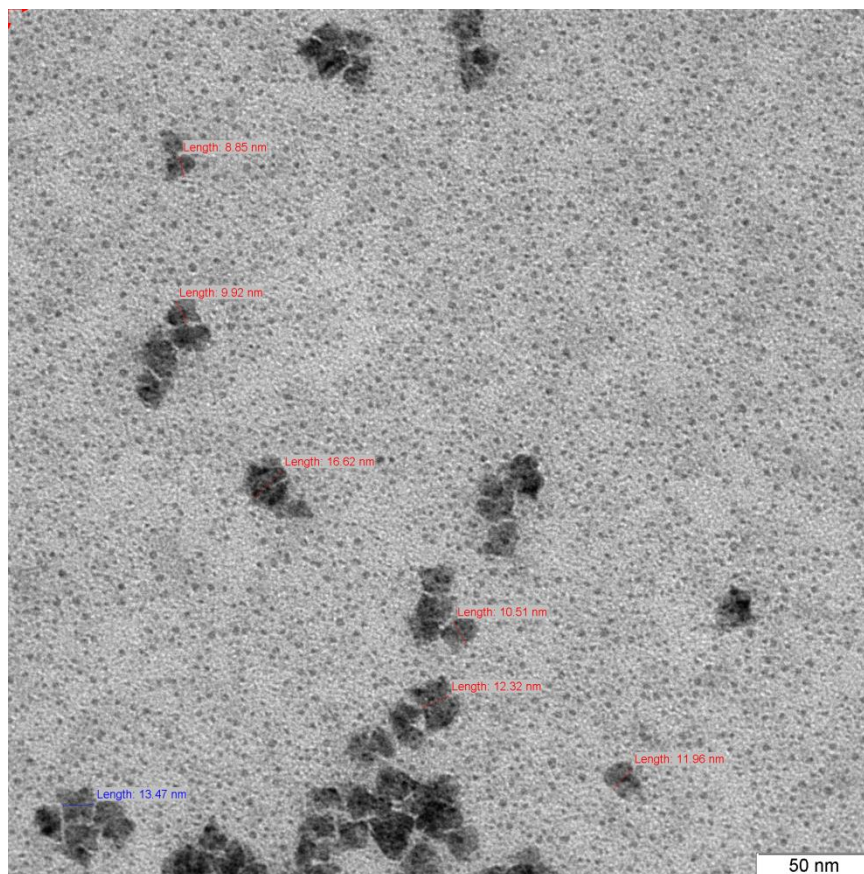


Рисунок 8 – ПЭМ изображение квантовых точек антимонида индия, используемых в данной работе.

При сравнении расчетных моделей и реальных данных, было получено, что наибольшей достоверностью обладает модель кубической КТ, т. к. она обладает наибольшим соответствием с реальными данными: 11-12 нм теоретические, и 11-12 нм реальных.

Сферическая модель дала результаты меньшей точности: 13-14 нм против 11-12 нм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения дипломной работы, было выполнено:

1. Анализ научной литературы по теме исследования.
2. Проведены расчеты энергетических спектров КТ селенида кадмия (CdSe) и антимонида индия (InSb) по кубической и сферической моделям.
3. Проведен ряд измерений спектральных характеристик квантовых точек антимонида индия (InSb) и селенида кадмия (CdSe) с целью определения максимума поглощения в исследуемых структурах
4. Проведено сопоставление рассчитанных характеристик энергетического спектра КТ с экспериментальными результатами, проверено и подтверждено влияние формы квантовых точек на их спектральные характеристики.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что наиболее адекватной моделью энергетического спектра исследуемых квантовых точек полупроводниковых образцов InSb и CdSe, является кубическая модель. Так же было определено, что реальная форма квантовых точек (сферическая и кубическая модели) при одном и том же характерном размере, будет оказывать влияние на электронный спектр рассматриваемых объектов и, соответственно, на их оптические и электронные свойства, что может рассматриваться как еще один из основных факторов управления свойствами квантовых точек.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин. Основы наноэлектроники //М., Логос. – 2006. - С. 95-98.
- 2 Marius Grundmann. The Physics of Semiconductors. An Introduction Including Nanophysics and Applications. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2012, С. 379-381.