

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

Кафедра физики полупроводников

**Анализ параметров полупроводниковых квантовых точек методом  
туннельных дифференциальных вольт-амперных характеристик**

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

Студента 2 курса 202 группы

направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Гаврикова Максима Владимировича

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_   
подпись, дата

Кабанов В. Ф.  
фамилия, инициалы

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_   
подпись, дата

Михайлов А.И.  
фамилия, инициалы

Саратов 2019

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Общая характеристика работы.**

**Актуальность темы.** Полупроводниковые структуры, используемые в твердотельных электронных приборах, могут содержать одиночные, либо многочисленные и определенным образом упорядоченные квантово-размерные объекты. Наночастицы (или квантовые точки) являются одними из наиболее интересных квантово-размерных структур для целей применения в оптоэлектронике и наноэлектронике. К числу наиболее перспективных и интересных с практической точки зрения полупроводниковых материалов уже многие годы относятся полупроводники из групп  $A^2B^6$  и  $A^3B^5$ . Материалы этих групп имеют высокий квантовый выход люминесценции, фотостабильность и широко используются в оптоэлектронике. Электронные и оптические свойства полупроводниковых квантовых точек и их содержащих полупроводниковых макрообъектов (в частности, электронный спектр, длина волны излучения и поглощения, коэффициент экстинкции) зависят от размеров полупроводниковых КТ, поэтому определение их размеров является довольно важной задачей.

### **Цель и задачи магистерской работы.**

Методы СЭМ и оптической спектроскопии не всегда могут обеспечить однозначную интерпретацию экспериментальных данных (в том числе и оценка размеров) в случае, когда квантовая точка не является однородной по структуре или в случае, когда несколько частиц образуют конгломерат. В связи с этим для более полного анализа особенностей полученных пленочных образцов с наночастицами, в частности, размера и электронного спектра, в данной работе была предложена и применена методика анализа дифференциальных нормированных туннельных ВАХ, полученных на сканирующем туннельном микроскопе.

**Положение, выносимое на защиту.** В данной работе была предложена методика характеристики (в частности, определения размера и формы) полупроводниковых квантовых точек, основанная на анализе

дифференциальных нормированных туннельных вольт-амперных характеристик. Результаты, полученные при ее применении для характеристики квантовых точек селенида кадмия и антимонида индия, согласуются с результатами сторонних измерений различными методами, что позволяет сделать вывод о справедливости предлагаемой методики.

**Структура магистерской работы.** Кроме ВВЕДЕНИЯ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ, СПИСКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ и ПРИЛОЖЕНИЙ работа включает 4 основных раздела:

1. Исследование наноструктурированных материалов на основе полупроводниковых квантовых точек
2. Практическая часть

**В раздел 1** был проведен анализ литературы по сопутствующим данной работе темам. Внимание уделялось рассмотрению особенностей квантово-размерных структур, таких как квантовые точки (их физическим особенностям, методам создания и сферам их применения). Также были рассмотрены основные методы характеристики данных структур, такие как масс-спектральный метод анализа, фотоэмиссионная и рентгеновская спектроскопия, растровая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, а также атомно-силовая микроскопия и сканирующая туннельная микроскопия. Были рассмотрены основные преимущества и недостатки вышеперечисленных методов. Анализ литературных источников по данным тематикам позволил в дальнейшем успешно реализовать поставленные экспериментальные задачи.

Также в данной главе были рассмотрены модельные представления процесса токопереноса в системе полупроводниковая квантовая точка – вакуумный зазор – металлический зонд при СТМ-измерениях.

**В разделе 2** было проведено описание объектов исследования, методов исследования и характеристика полученных образцов. Также был проведен

анализ полученных экспериментальных данных, на основании которого были сделаны выводы об успешности выполненной работы.

**В разделе 2.1** в качестве объектов исследования были выбраны квантовые точки групп  $A^2B^6$  и  $A^3B^5$  (соединения CdSe и InSb), полученные на химическом факультете Саратовского государственного университета и в ФГУП «Научно-исследовательский институт прикладной акустики» в Дубне, соответственно. В качестве стабилизаторов использовались олеиновая кислота для раствора КТ CdSe и триоктилфосфин (TOP) для раствора КТ InSb. Для формирования монослойной структуры и для предотвращения агрегации КТ друг с другом, в исходные коллоидные растворы квантовых точек CdSe и InSb был добавлен хлороформ до получения концентрации КТ порядка  $(5-6) \times 10^{-3}$  М. Для формирования образцов, пригодных для исследования методами сканирующей туннельной микроскопии была применена методика Ленгмюра-Блоджетт (в данной главе приводится ее краткое описание). Таким образом были сформированы структуры, показанные на рисунке 1.

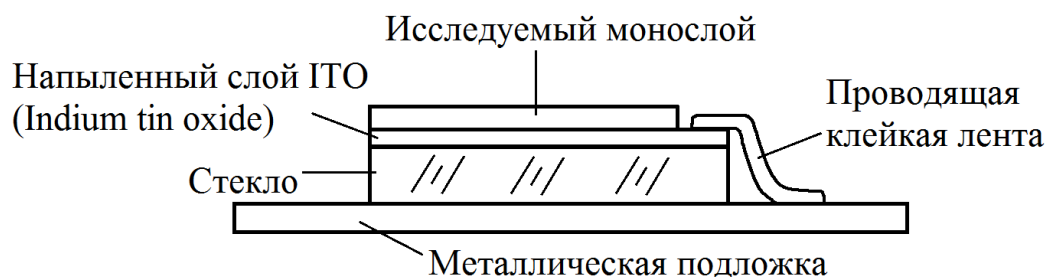


Рисунок 1 – Структура полученных образцов

**В разделе 2.2** приводится описание методов исследования, применяемых в данной работе, а также наименование используемых установок. Исследования полученных образцов методами СТМ для применения предлагаемой методики производились при помощи установки SOLVER NANO (NT-MDT). Данная установка является сканирующим зондовым микроскопом, позволяющим осуществлять исследования как методами сканирующей туннельной микроскопии, так и атомно-силовой микроскопии. Помимо этого, образцы были так же измерены при помощи лазерного анализатора размера частиц

Zetasizer Nano ZS (Malvern Panalytical Ltd.), позволяющего оценивать размер объектов в растворе прямо в жидкой фазе, методами оптической спектроскопии на ИК-Фурье спектрометре IRAffinity-1 (Shimadzu Corp.), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа MIRA 2 LMU, а также при помощи просвечивающей электронной микроскопии на установке Libra 120.

**В разделе 2.3** описывается непосредственно применение предлагаемой в работе методики.

При помощи СТМ-микроскопа производилось получение вольт-амперных характеристик (ВАХ) исследуемых образцов с пленками квантовых точек. Далее для анализа экспериментальных туннельных ВАХ использовалась методика нормированных дифференциальных туннельных ВАХ – зависимостей  $(dI/dV)/(IV)$  от напряжения  $V$ . Кроме того, этот метод может использоваться для анализа механизмов проводимости исследуемых структур, расчета параметров и ряда других важных электронных процессов.

В качестве первого объекта для исследования и применения предлагаемой методики были использованы КТ из хорошо изученного полупроводникового соединения – CdSe. В соответствии с модельными представлениями, изложенными в главе 1, были построены расчетные значения энергии электрона для первых трех разрешенных уровней в квантовой точке (рисунок 2 (a, b)).

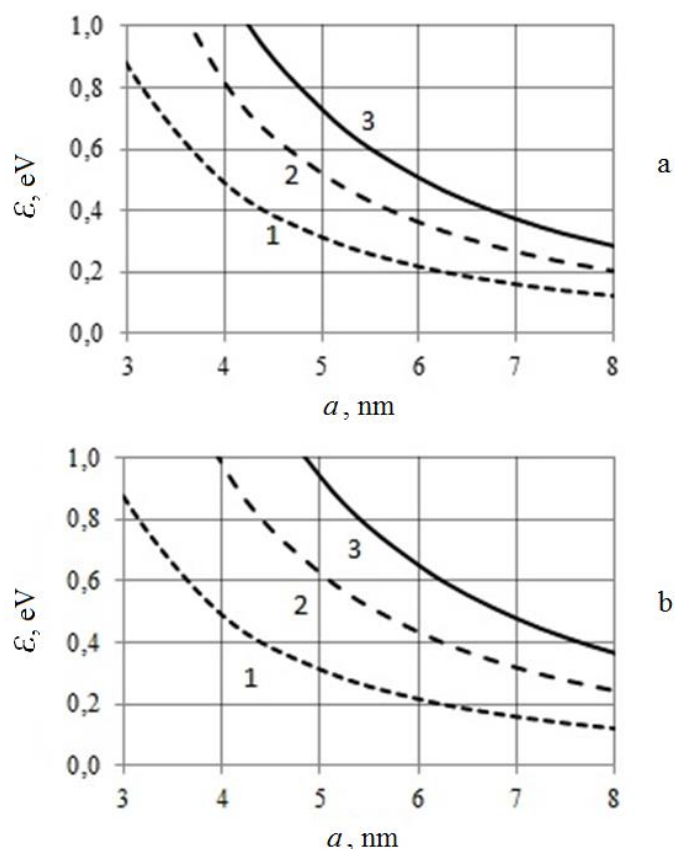


Рисунок 2 – Расчетные значения энергии электрона для первых трех разрешенных уровней КТ CdSe: (а) – по модели «шаровой» КТ, (б) – по модели «кубической» КТ.

В соответствии с полученными ранее модельными представлениями, была проведена оценка характерных размеров КТ исследуемых образцов. В ходе исследований рассматривались и анализировались нормированные дифференциальные туннельные ВАХ при отрицательном потенциале смещения на подложке относительно зонда (рисунок 3). В этом случае происходит туннелирование электронов из электрода ИТО через дискретные уровни квантово-размерного объекта в зонд туннельного микроскопа. Дискретный спектр энергии электронов проводимости исследуемых квантово-размерных объектов обуславливает появление пиков на нормированных дифференциальных ВАХ. Данные пики характерны для туннелирования электронов с 1, 2 и 3 энергетических уровней КТ в металлический зонд.

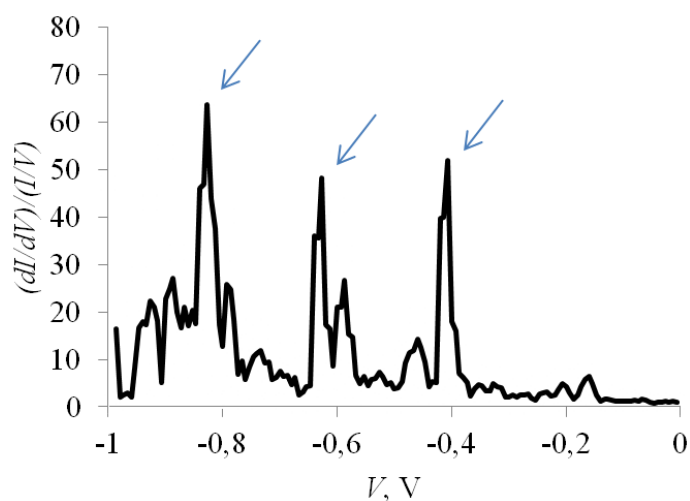


Рисунок 3 – Типичные дифференциальные туннельные ВАХ КТ CdSe.

Далее величины напряжения, при которых наблюдаются пики, были поставлены в соответствие со значениями энергии на полученных ранее зависимостях уровней энергетического спектра КТ от ее размера. Таким способом определялась область (на рисунке 4 (а, b) показана прямоугольными фигурами) которая содержит в себе распределение размеров исследуемых КТ (4,3 – 4,8 нм).

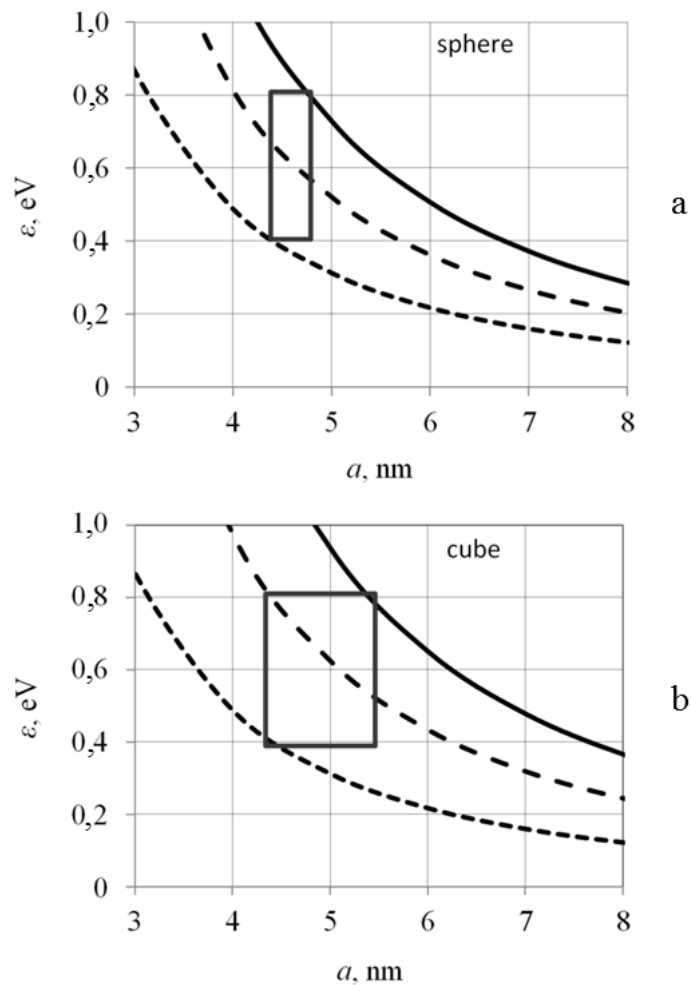


Рисунок 4 – Соответствие значений напряжения, при которых наблюдаются пики с расчетными значениями уровней энергетического спектра КТ, (а) и (b) – шаровая и кубическая модель КТ.

Для выяснения справедливости вышеизложенного подхода была проведена серия косвенных и прямых измерений исследуемых объектов методами анализа спектральной характеристики исследуемых образцов, при помощи лазерного анализатора размера частиц, а также на просвечивающем электронном микроскопе. Обработка изложенных выше данных, полученных различными методами, позволила сделать вывод, что расчетные значения размеров исследуемых КТ, полученных при применении предлагаемой методики, находятся в хорошем качественном и количественном согласии с этими данными.

Второй выбранный нами для подтверждения достоверности используемого подхода полупроводниковый материал – антимонид индия. Полученная



нормированная дифференциальная туннельная ВАХ данных образцов представлены на рисунке 5.

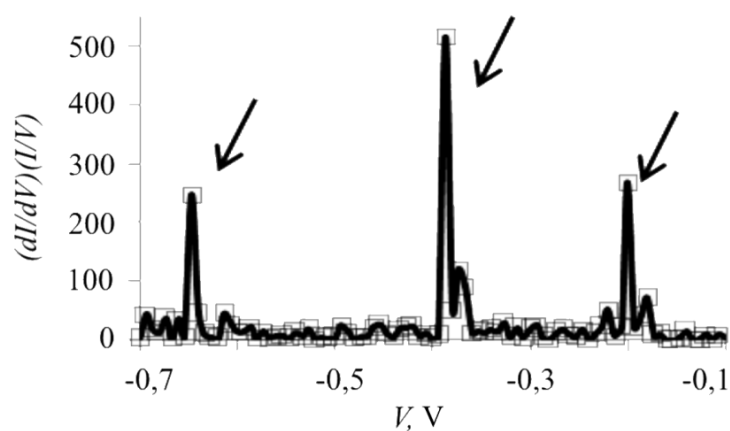


Рисунок 5 – Типичные дифференциальная туннельная ВАХ КТ InSb.

Аналогичным изложенному ранее способу, полученные значения напряжения, при которых наблюдаются пики на нормированных дифференциальных туннельных ВАХ, были поставлены в соответствие в соответствие со значениями энергии на полученных ранее зависимостях уровней энергетического спектра КТ (рисунок 6).

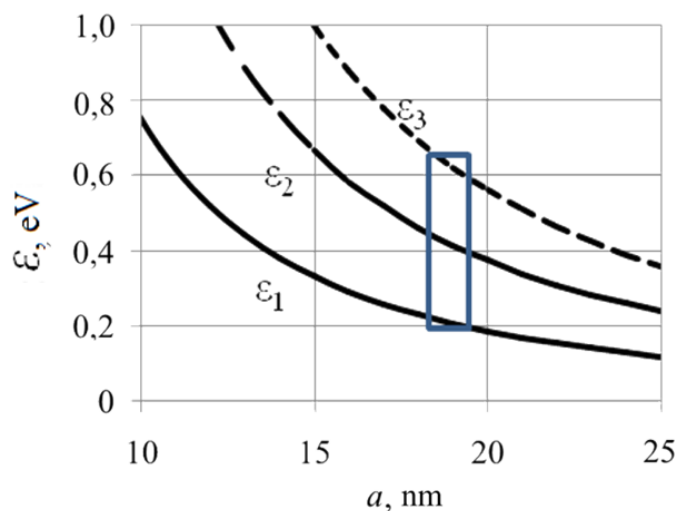


Рисунок 6 – Вычисленные значения энергии электрона проводимости для первых трех разрешенных уровней в КТ InSb как функция характерного размера  $a$  (кубическая модель КТ).

Оценка значения размера КТ InSb методом сравнения вычислений электронного спектра с анализом экспериментальных туннельных ВАХ позволила оценить размер КТ в диапазоне 17-19 нм.

Аналогичная серия дополнительных независимых измерений различными методами была проведена и для данных образцов. Результаты данных измерений также хорошо согласуются с полученными при помощи предлагаемой методики.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.**

Для выполнения поставленных задач создания и характеристики монослойной структуры на основе квантовых точек состава CdSe и InSb методами СТМ, в ходе данной работы были проанализированы литературные источники по темам: полупроводниковые наночастицы и квантовые точки, методы создания полупроводниковых квантовых точек, методы характеристики квантовых точек, а так же литературные данные о сканирующей туннельной микроскопии. Помимо того, были рассмотрены модельные представления процесса туннелирования в системе КТ–вакуумный зазор–зонд.

При помощи технологии Ленгмюра-Блоджетт были созданы монослойные структуры на основе исследуемых квантовых точек. Их электрофизические свойства были исследованы методом СТМ в соответствии с описанными в работе модельными представлениями.

Была предложена методика анализа параметров полупроводниковых квантовых точек методом туннельных ВАХ, в соответствии с которой были определены такие характеристики исследуемых объектов как энергетический спектр КТ, их размер и форма. Далее были проведены контрольные измерения с помощью лазерного анализатора размера частиц, анализа спектральных характеристик, сканирующей электронной микроскопии и просвечивающей электронной микроскопии. Все описанные методы оценки размеров КТ показали хорошее качественное и количественное согласование результатов с результатами, полученными при использовании предлагаемой методики, при погрешности не более 10 %. При этом метод анализа дифференциальных нормированных туннельных ВАХ позволил определить более адекватную модель для определения энергетического спектра КТ: «шаровую» для КТ CdSe и «кубическую» для КТ InSb. Кроме того, этот метод может использоваться для

анализа механизмов проводимости исследуемых структур, расчета параметров и ряда других важных электронных процессов. Все это позволяет считать, что метод анализа дифференциальных нормированных туннельных ВАХ является эффективным методом экспресс-анализа, который может быть использован при изучении квантово-размерных объектов, так как он обладает рядом преимуществ перед традиционными методами анализа подобных объектов, такими как дешевизна, простота реализации, а так же однозначность интерпретации экспериментальных данных в случаях, когда производится исследование не отдельных наночастиц или квантовых точек, а их конгломератов и/или квантовых точек сложного химического состава.