

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

Кафедра физики твёрдого тела

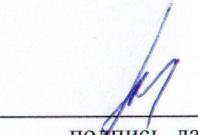
**Исследование токопереноса в системе зонд туннельного  
микроскопа – туннельный зазор – квантовые точки  
полупроводников  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$  при освещении**

АФТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2252 группы  
направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»  
института физики

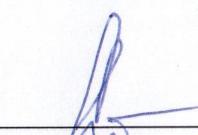
Бирюкова Ярослава Николаевича

Научный руководитель  
доцент кафедры физики  
твердого тела, к.ф.-м.н., доцент  
должность, ученая степень, ученое звание

  
подпись, дата

В.Ф. Кабанов  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой физики твёрдого  
тела  
д.ф.-м.н., профессор  
должность, ученая степень, ученое звание

  
подпись, дата

Ал.В. Скрипаль  
инициалы, фамилия

Саратов 2023

## **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.

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

**Актуальность:** Изучение 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.

Методы сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) дают возможность определения энергетического спектра квантовых точек, но не всегда могут обеспечить однозначную интерпретацию экспериментальных данных (в том числе и оценку 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 полупроводниковых квантовых точек, в частности, электронного спектра, в данной работе была применена методика анализа дифференциальных нормированных тунNELьных ВАХ, полученных на сканирующем тунNELьном микроскопе при освещении.

**Целью данной работы** является исследование особенностей токопереноса в системе зонд тунNELьного микроскопа – тунNELьный зазор – квантовые точки InSb и CdSe при освещении.

Для выполнения данной цели решались следующие задачи:

1. Проведение анализа научной литературы по связанным с исследованиями темам.

2. Получение и анализ вольт-амперных характеристик в системе зонд туннельного микроскопа – туннельный зазор – квантовые точки полупроводников InSb и CdSe – электрод.

3. Обработка полученных результатов.

### **Исследуемая структура**

Исследуемая структура представляет собой монослой полупроводниковых квантовых точек селенида кадмия (CdSe), и квантовых точек антимонида индия (InSb).

### **Оборудование и методика измерений**

Исследования полученных образцов производились при помощи сканирующего зондового микроскопа SOLVER NANO и просвечивающего электронного микроскопа Libra 120.

Перед исследованием туннельной ВАХ отдельной квантовой точки проводилось сканирование поверхности сформированной пленки методами СТМ в режиме постоянного тока. После анализа полученного СТМ образа поверхности макрообразца выбиралось не менее 10 точек для снятия ВАХ. В автоматическом режиме измерялись не менее 10 ВАХ на точку. Измерения ВАХ проводились в пределах величин тока от  $10^{-11}$  до  $10^{-9}$  А, напряжения – от 0 до 2 В.

Анализ экспериментальных туннельных ВАХ проводился с использованием методики нормированных дифференциальных туннельных ВАХ – зависимостей  $(dI/dV)/(I/V)$  от напряжения V (минус на электроде ITO) [1, 2, 3].

### **Эксперимент**

Для предварительной оценки положения уровней энергетического спектра полупроводниковых квантовых точек InSb использовалась модель КТ кубической формы, с ребром d, положение уровней энергетического спектра может быть представлено как:

$$\varepsilon_i = \frac{(\pi\hbar)^2}{2m^*} * \frac{1}{d^2} * (l^2 + m^2 + n^2) \quad (1)$$

где  $l$ ,  $m$ ,  $n = 1, 2, 3$ ;  $m^*$  является эффективной массой носителя заряда для объёмного материала. В случае полупроводниковых квантовых точек CdSe, использовалась модель КТ шаровой формы, с радиусом  $R$ :

$$\varepsilon_i = \frac{\hbar^2}{2m^*} * \frac{k_{nl}^2}{R^2} \quad (2)$$

где  $m^*$  является эффективной массой для объёмного материала;  $k_{nl}$  приведен в таблице 1 [4].

Таблица 1 – Значение величины  $k_{nl}$

$k_{nl}$	$l=0$	$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=4$	$l=5$
$n=0$	3,14	4,49	5,76	6,99	8,18	9,36
$n=1$	6,28	7,73	9,1	10,42		
$n=2$	9,42					

Результаты, демонстрирующие, что энергетический спектр полупроводниковых КТ, рассчитанный с помощью моделей для шаровой и кубической форм, различаются на доли электронвольт демонстрируются на Рисунок 1.

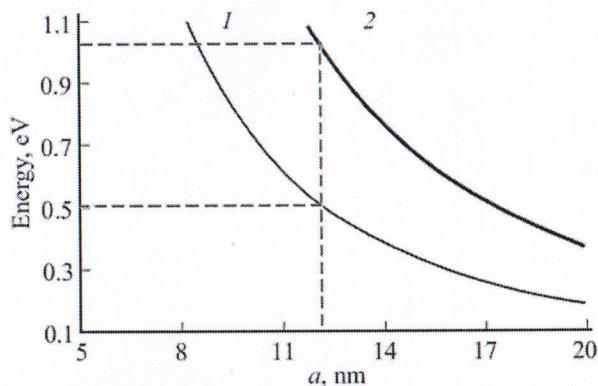


Рисунок 1 – Типичные расчетные кривые первого энергетического уровня полупроводниковой КТ на основе InSb, в зависимости от её размера, для кубической (1) и шаровой (2) моделей.

После построения графиков 1-го энергетического уровня для электрона и дырки для полупроводниковых КТ для двух случаев: а) сферической (CdSe) и б) кубической модели (InSb), проводилась оценка максимума поглощения в спектре КТ:

$$\mathcal{E}_{hv} = \mathcal{E}_{go} + \mathcal{E}_{c1} + \mathcal{E}_{v1}, \quad (3)$$

где  $\mathcal{E}_{hv} = hv$  – энергия кванта в области максимума поглощения,  $\mathcal{E}_{go}$  – ширина запрещенной зоны объемного материала,  $\mathcal{E}_{c1}$  – величина первого уровня энергии электрона квантовой точки, отсчитываемой от дна зоны проводимости объемного материала,  $\mathcal{E}_{v1}$  – величина первого уровня энергии дырки, отсчитываемой от потолка валентной зоны объемного материала.

Для полупроводниковых КТ на основе InSb, при размерах порядка 8 нм, величина энергии кванта света в области максимума поглощения, приблизительно равна 1 эВ.

Для полупроводниковых КТ на основе CdSe, при размерах порядка 5 нм, данная величина составила 2,2 эВ

Было предположено, что если через энергетические уровни КТ будет протекать туннельный ток, вызванный не только эмиссией электронов из металлического электрода, но, например, и фотогенерированными носителями, пик на нормированных дифференциальных туннельных ВАХ, связанный именно с изменением приложенного смещения в системе ( $dI/dV$ ), будет сильно «размываться» или вообще отсутствовать. Наличие такого эффекта можно ожидать при облучении квантами света соответствующей энергии. Можно предположить, что в случае облучения квантами меньшей энергии (переход  $\mathcal{E}_{v1} - \mathcal{E}_{c1}$  осуществляться не будет), этот процесс будет выражен менее ярко или вообще отсутствовать.

В данной работе измерения проводились при подсветке образцов полупроводниковых квантовых точек CdSe и InSb. В работе использовалось подсветка от светодиодов «зеленого» (530 нм – 2,3 эВ для КТ InSb), «синего» (450 нм – 2,75 эВ для КТ CdSe) и «красного» (640 нм – 1,9 эВ) света.

Результаты анализа экспериментальных данных при подсветке «красным» светом с энергией кванта порядка 1,9 эВ КТ CdSe, что меньше, чем переход (3), показали, что в этом случае пик, соответствующий первому уровню КТ, исчезает (рисунок 2).

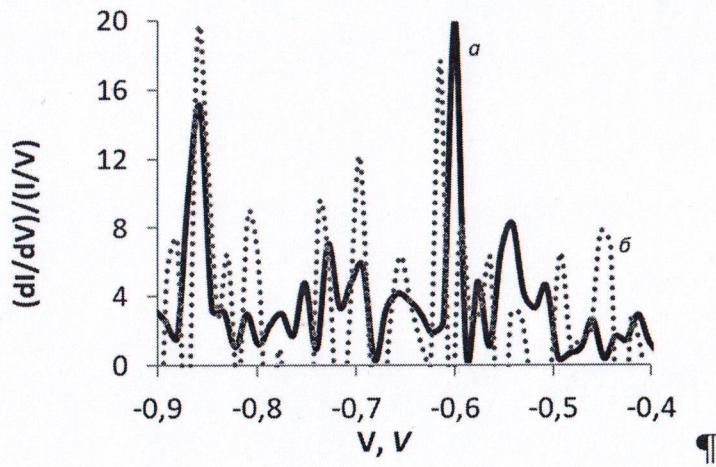


Рисунок 2 – Типичная нормированная дифференциальная ВАХ КТ CdSe (размер  $\approx 5$  нм) а) - без освещения, б) –при освещении светом с  $\lambda = 640$  нм (1,9 эВ).

При подсветке светом с энергией кванта превышающей требуемую энергию кванта поглощаемого излучения для КТ CdSe, наблюдается исчезновение пика, соответствующий на нормированных дифференциальных туннельных ВАХ первому уровню энергетического спектра КТ CdSe, что видно из графиков (рисунок 3 и рисунок 4).

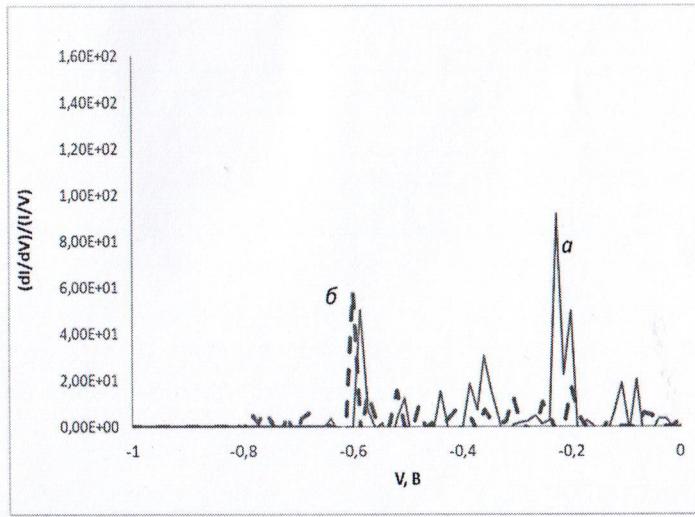


Рисунок 3 – Типичная нормированная дифференциальная ВАХ КТ CdSe (размер  $\approx 7$  нм) : а) - без освещения, б) –при освещении светом с  $\lambda = 530$  нм (2,3 эВ).

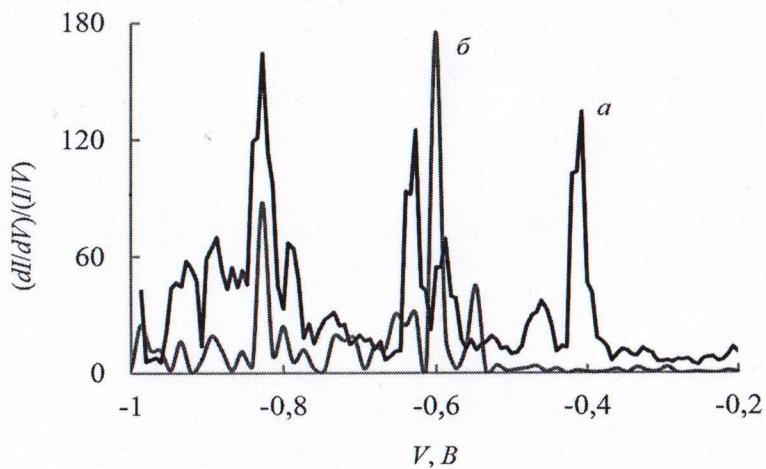


Рисунок 4 – Типичная нормированная дифференциальная ВАХ КТ CdSe (размер  $\approx 5$  нм): а) - без освещения, б) –при освещении светом с  $\lambda = 450$  нм (2,75 эВ).

Результаты, сходные с результатами, полученными при анализе энергетического спектра по методу нормированных дифференциальных туннельных ВАХ для КТ CdSe, демонстрируют и КТ на основе InSb (рисунки 5-6):

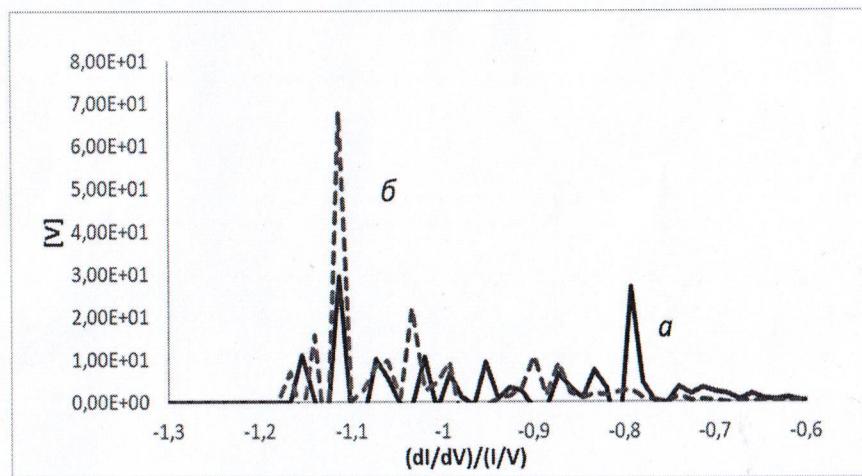


Рисунок 5 - Типичная нормированная дифференциальная ВАХ КТ InSb (размер  $\approx 10$  нм): а) - без освещения, б) –при освещении светом с  $\lambda = 640$  нм (1,9 эВ).

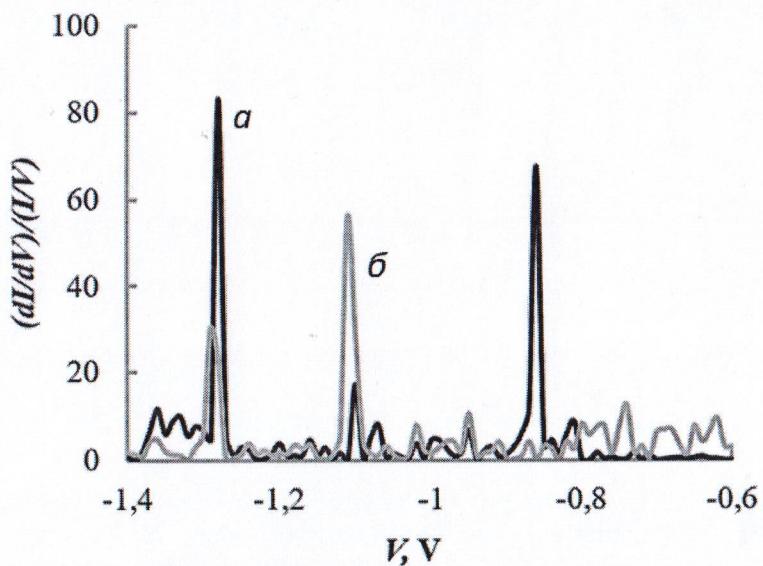


Рисунок 6 - Типичная нормированная дифференциальная ВАХ КТ InSb (размер  $\approx 10$  нм): а) - без освещения, б) – при освещении светом с  $\lambda = 530$  нм (2,3 эВ).

Как следует из анализа экспериментальных данных в значительном количестве случаев при подсветке пик, соответствующий на нормированных дифференциальных туннельных ВАХ первому уровню энергетического спектра КТ *InSb* (примерно 0,85 эВ) исчезал.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для выполнения поставленных задач исследования особенностей токопереноса в системе зонд туннельного микроскопа – туннельный зазор – квантовые точки полупроводников групп  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$  при освещении, в ходе данной работы было выполнено:

1. Проанализированы литературные источники по темам: полупроводниковые наночастицы и квантовые точки, методы создания полупроводниковых квантовых точек, методы характеризации квантовых точек, а также литературные данные о сканирующей туннельной микроскопии. Помимо того, были рассмотрены модельные представления процесса туннелирования в системе КТ – туннельный зазор – зонд.
2. Проведены и проанализированы расчеты энергетических спектров КТ CdSe и InSb по сферической и кубической моделям соответственно.
3. Проведена оценка энергии перехода  $\varepsilon_{c1} - \varepsilon_{v1}$  в полупроводниковых квантовых точках селенида кадмия (CdSe) и антимонида индия (InSb) с целью определения максимума поглощения в исследуемых структурах.
4. Созданы монослойные структуры на основе исследуемых квантовых точек с использованием технологии Ленгмюра-Блоджетт.
5. Проведено исследование и анализ вольт-амперных характеристик квантовых точек CdSe и InSb с использованием СТМ в соответствии с описанными в работе модельными представлениями .
6. Исследованы особенности токопереноса в системе зонд туннельного микроскопа – туннельный зазор – слой квантовых точек полупроводников групп  $A_2B_6$  и  $A_3B_5$  при освещении оптическим излучением разных длин волн. Экспериментально установлено, что пик на нормированных дифференциальных туннельных ВАХ, соответствующий первому дискретному уровню электронного энергетического спектра исследуемых

квантовых точек, при освещении может исчезать или существенно уменьшаться по величине. Исчезновение или существенное уменьшение величины этого пика, по крайней мере, до величины шумов наблюдается, если энергия квантов и интенсивность облучающего света обеспечивает возбуждение достаточного количества электронов с 1-го уровня валентной квази-зоны на 1-й уровень квази-зоны проводимости исследуемых квантовых точек.

Наблюдаемый эффект необходимо учитывать при интерпретации экспериментальных результатов по исследованию туннельных ВАХ в исследуемых системах с квантовыми точками.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

- 1 Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: Учебное пособие для студентов старших курсов. – Нижний Новгород:
- 2 Троян В.И., Пушкин М.А., Борман В.Д., Тронин В.Н., Бормана В.Д. Физические основы методов исследования наноструктур и поверхности твердого тела: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2008. – 260 с.
- 3 Демиховский В.Я., Филатов Д.О. Исследование электронных состояний в низкоразмерных структурах методами сканирующей зондовой микроскопии: Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Физико-химические основы нанотехнологий». – Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2007. – 77 с.,
- 4 Yvonne Williams, Alyona Sukhanova, Malgorzata Nowostawska, Anthony M. Davies, Siobhan Mitchell, et. al. Probing Cell-Type-Specific Intracellular Nanoscale Barriers Using Size-Tuned Quantum Dot // Small. – 2009. - №5. - Р. 2581-2588

