

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики полупроводников

**Эффекты размерного квантования на выступах поверхности
полупроводников группы A^3B^5**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 412 группы

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Рухлова Никиты Андреевича

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент
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 2017

Введение. В настоящее время исследование структур с квантово-размерными эффектами является одним из самых актуальных направлений физики и техники полупроводников в связи с развитием микроэлектроники и наноэлектроники. С переходом к структурам с квантово-размерными эффектами возникают сложности, требующие особого подхода с применением новых методов измерений. Исследование квантово-размерных эффектов в таких структурах позволяет разрабатывать и создавать микроэлектронные устройства с верхней границы диапазона рабочих частот, которые принимают значения порядка единиц терагерц (ТГц), время переключения составляет ~ 1 пс. Проявление квантово-размерных ограничения носителей заряда в структурах используется как при создании сверхбыстродействующих микроэлектронных приборов, но и являются перспективными элементами для создания элементов оптоэлектронных приборов, например для лазерных диодов и потических переключающих устройств. Это объясняется квантованием энергии и импульса носителей заряда, то есть наличием квантово-размерных эффектов. На данный момент предпринимаются попытки использовать эффект ограничения снизу временем туннелирования электронов со скоростью прохождения слоя толщиной 10^6 см менее чем за 10^{-13} с для создания свч приборов с рабочими частотами более 10^3 ГГц. Невозможность исследования данных структур обычными методами на данный момент – главное ограничение в исследовании таких структур. Для оптической микроскопии существует дифракционное ограничение, которое не позволяет применять ультрафиолетовую оптику с уровнем 0.1 мкм в связи с минимальной длиной волны поглощения ультрафиолетового света в воздухе порядка 0.19 мкм. Для электронной микроскопии существует всем известная проблема определения «края», помимо этого, видимый контраст не позволяет определить топологические размеры по координате y . В качестве решения всех указанных проблем могут выступить методы сканирующей зондовой микроскопии. Они позволяют изучать не только рельеф, но и ряд физических

свойств поверхности и объектов на ней. В связи с интенсивным развитием разнообразных технологий изготовления полупроводниковых структур, в центре внимания на данный момент находятся именно квантово-размерные объекты, что обусловлено совокупностью их уникальных свойств, отличных от свойств обычных систем. Причина проявления таких свойств – изменение энергетического спектра электронов и дырок в структурах с очень малыми размерами. Особый интерес представляют собой материалы группы A^3B^5 в связи с рядом особенностей: широкая область рабочих частот, высокие, по сравнению с остальными полупроводниковыми материалами, значения подвижностей носителей заряда, сохранение свойств материалов при комнатной температуре. Все вышеперечисленные особенности позволяют активно применять такие материалы в современной микроэлектронике. Материалы группы A^3B^5 являются основой современных больших и сверхбольших интегральных схем, на их основе создаются тиристоры и транзисторы, солнечные батареи, полупроводниковые лазеры и светодиоды, фотоприемники, а так же высокочувствительные термометры и датчики магнитных полей. [1]

Целью данной работы являлось исследование квантоворазмерных эффектов на выступах поверхности образцов группы A^3B^5 : GaAs и InSb, получение расчетных значений электрона для первых 4 разрешенных уровней для указанных выше материалов, получение дифференциальных ВАХ, их анализ и определение характерного размера квантоворазмерного объекта на выступах поверхности образцов.

В первой главе проведен аналитический обзор по теме дипломной работы. Основное внимание уделено преимуществам полупроводниковых соединений группы A^3B^5 , их получению, применению в современной нанoeлектронике и приборостроении, а так же методам исследования поверхности полупроводниковых образцов с помощью метода СТМ. Указаны преимущества, недостатки и ограничения выбранного метода исследования.

Описаны такие явления как квантоворазмерные эффекты, их свойства, необходимые для проявления условия.

Во второй главе представлена экспериментальная часть работы. Было проведено экспериментальное исследование квантоворазмерных объектов на выступах поверхности образцов полупроводников группы A^3B^5 .

В данном исследовании был использован метод сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Для получения ВАХ исследуемых выступов на поверхности объектов полупроводников группы A^3B^5 был выбран метод сканирующей туннельной микроскопии. Эксперимент проводился на установке «Наноэдюкатор-II».

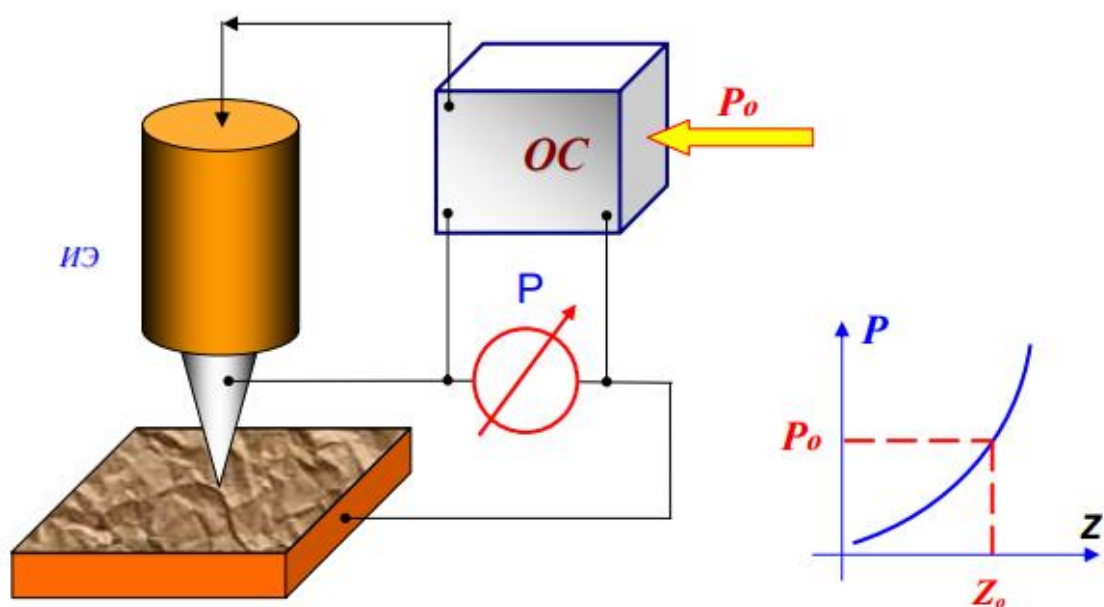


Рисунок 1. Схематическая иллюстрация общего принципа действия СТМ.

С помощью метода СТМ были получены вольт-амперные характеристики (ВАХ) туннельного контакта в различных точках поверхности образцов GaAs и InSb, что дало обоснования судить о локальной проводимости образцов и изучить особенности локальной плотности

состояний в энергетическом спектре электронов а также получить нормированные дифференциальные ВАХ

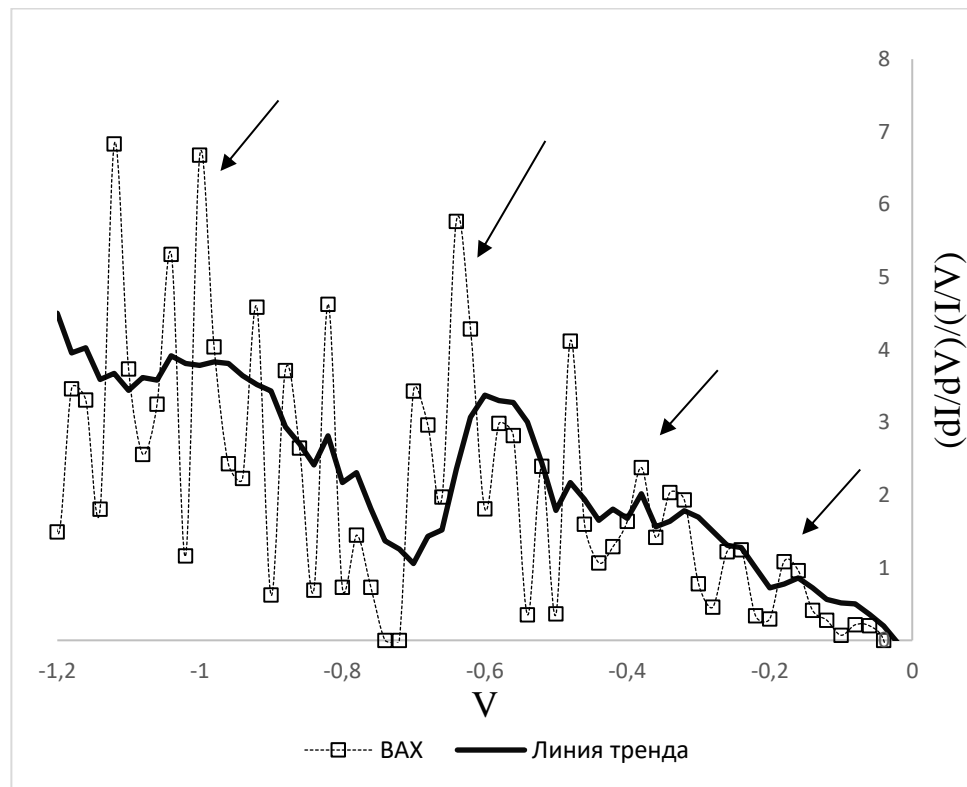


Рисунок 2. Нормированный дифференциальный ВАХ квантоворазмерных объектов на поверхности GaAs.

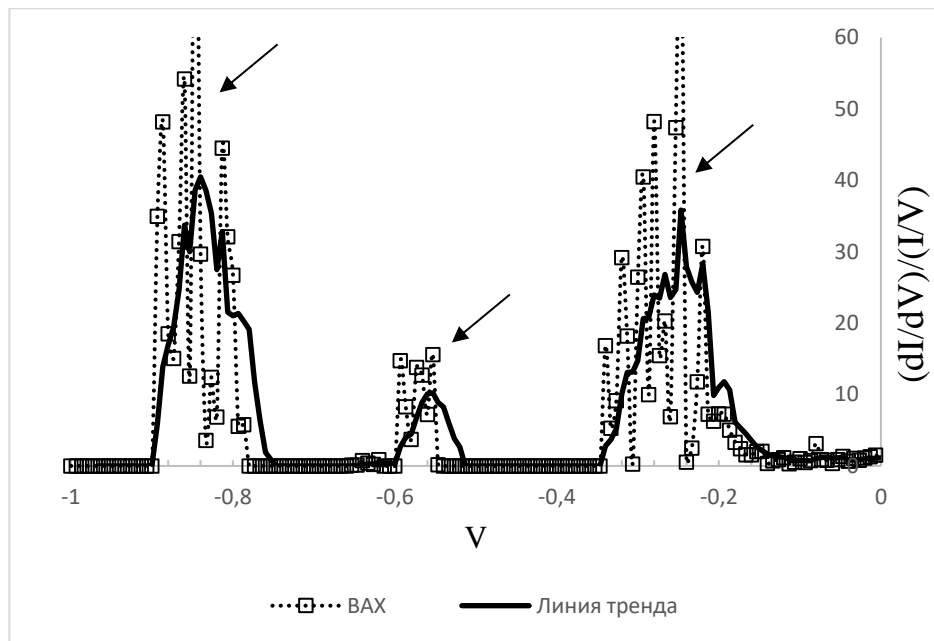


Рисунок 3. Нормированный дифференциальный ВАХ квантоворазмерных объектов на поверхности GaAs.

На образцах в исследованном интервале напряжений наблюдалось несколько пиков на нормированных дифференциальных ВАХ, пики указаны стрелками, которые можно связать с туннелированием электронов с разрешенных энергетических уровней квантоворазмерных объектов в зонд туннельного микроскопа.

Были получены расчетные значения энергии электрона для первых четырех разрешенных уровней для GaAs и InSb. В расчетах использовались следующие значения эффективной массы электронов в зоне проводимости:

$$m^* = 0.013m_0 \text{ для InSb,}$$

$$m^* = 0.063m_0 \text{ для GaAs, где } m_0 \text{ — масса свободного электрона.}$$

Как видно, при сравнимых величинах a значение энергии первого уровня и интервалы между соседними уровнями энергии для GaAs в 3–5 раз меньше, чем для InSb и InAs, и будут трудно различимы на фоне тепловых флуктуаций (значений kT), соответствующих комнатной температуре.

Таким образом, предварительная оценка показывает, что заметное проявление размерного квантования для GaAs требует существенно меньших размеров квантового объекта, чем в случае с InSb.

Локализованные энергетические уровни на поверхности полупроводниковых образцов и в том числе связанные со свойствами квантоворазмерного объекта, формируемого на выступах шероховатой поверхности, проявляются на дифференциальных туннельных ВАХ в виде отдельных пиков, указанных выше.

Расчетные значения энергии электрона для первых четырех разрешенных уровней в соответствии с формулой для GaAs и InSb представлены на рисунках (10) и (11):

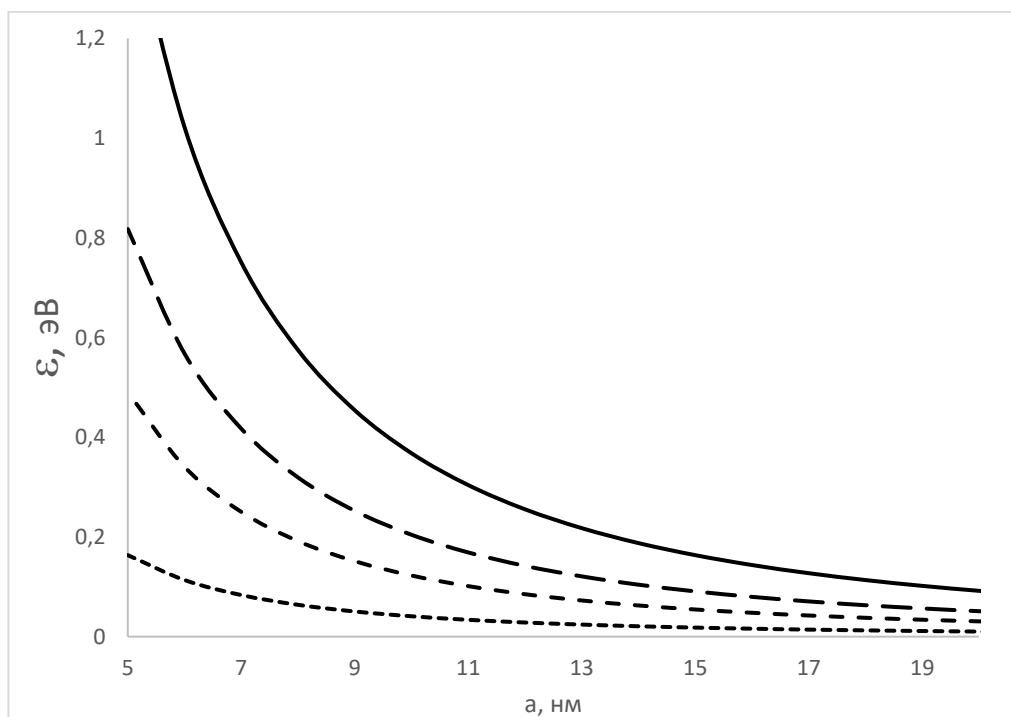


Рисунок 4. Расчетные значения энергии электрона для первых четырех разрешенных уровней для GaAs.

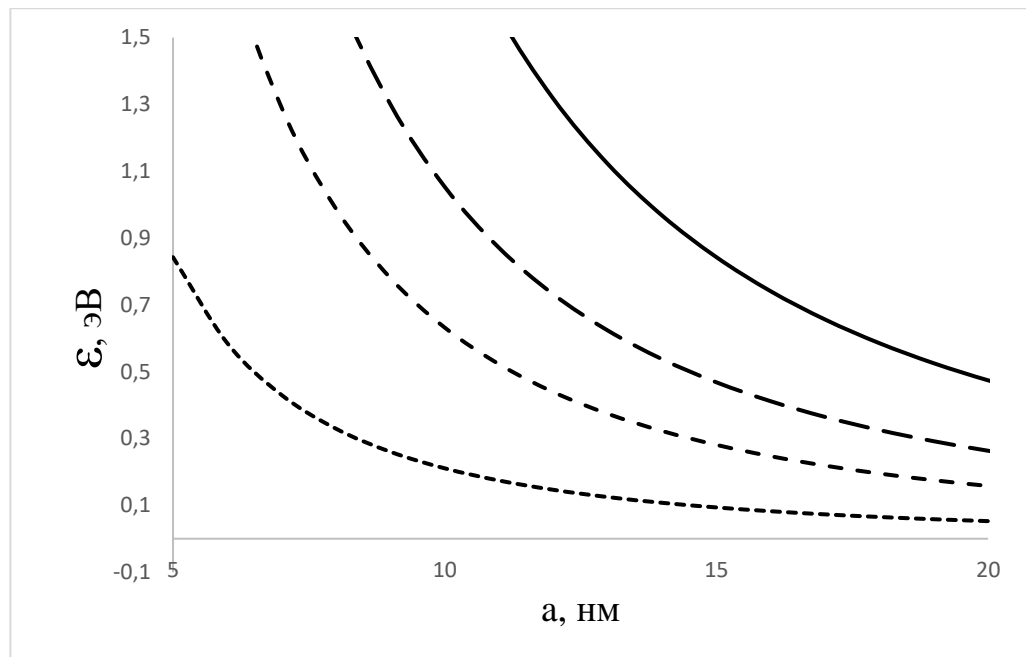


Рисунок 5. Расчетные значения энергии электрона для первых четырех разрешенных уровней для InSb.

Анализ экспериментальных данных по оценке интервалов между пиками на графике для GaAs на основании усреднения по группе образцов дал значения порядка 0.14 V для 1-го пика, 0.37 V для 2-го пика, 0.64 V для 3-го пика и 0.99 V для 4-го пика. Эти данные позволяют оценить положение первых трех уровней электронного спектра квантового объекта, отсчитываемых от дна зоны проводимости объемного материала: соответственно 0.14, 0.37, 0.64 и 0.99 eV. В соответствии с расчетными результатами, представленными на рисунке (14), была проведена оценка величины линейных размеров квантоворазмерного объекта a , которые составили 5.3–6.3 nm

Анализ экспериментальных данных по оценке интервалов между пиками на графике для InSb на основании усреднения по группе образцов дал значения порядка 0.22 V для 1-го пика, 0.55 V для 2-го пика и 0.86 V для 3-го пика. Эти данные позволяют оценить положение первых трех уровней электронного спектра квантового объекта, отсчитываемых от дна зоны

проводимости объемного материала: соответственно 0.22, 0.55 и 0.86 eV. В соответствии с расчетными результатами, представленными на рисунке (15), была проведена оценка величины линейных размеров квантоворазмерного объекта a , которые составили 10.1-11.1 нм. Результаты представлены ниже.

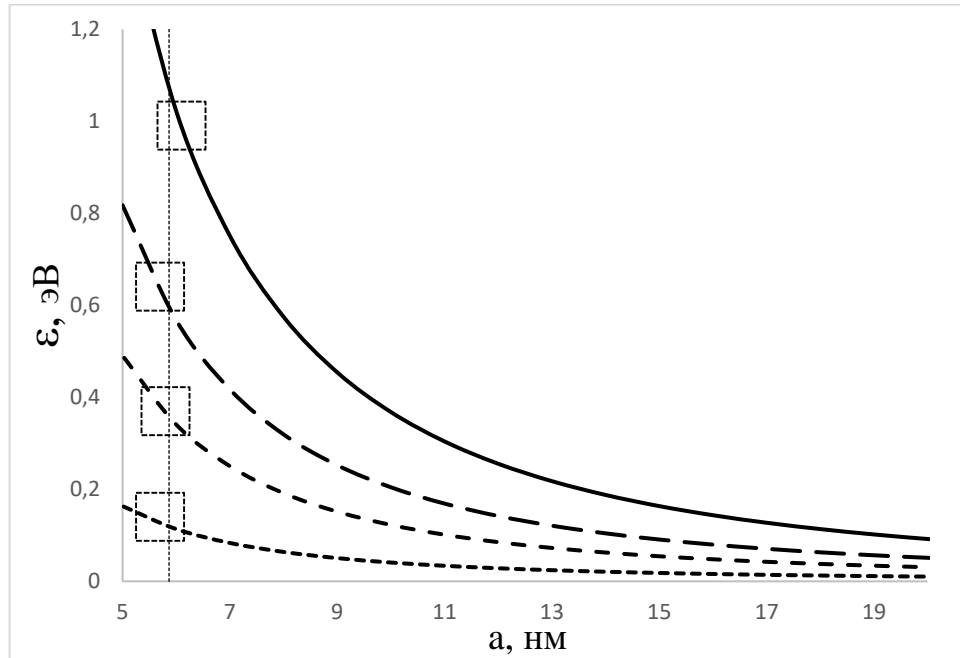


Рисунок 6. Зависимость энергии электрона от размера квантово-размерного объекта для GaAs.

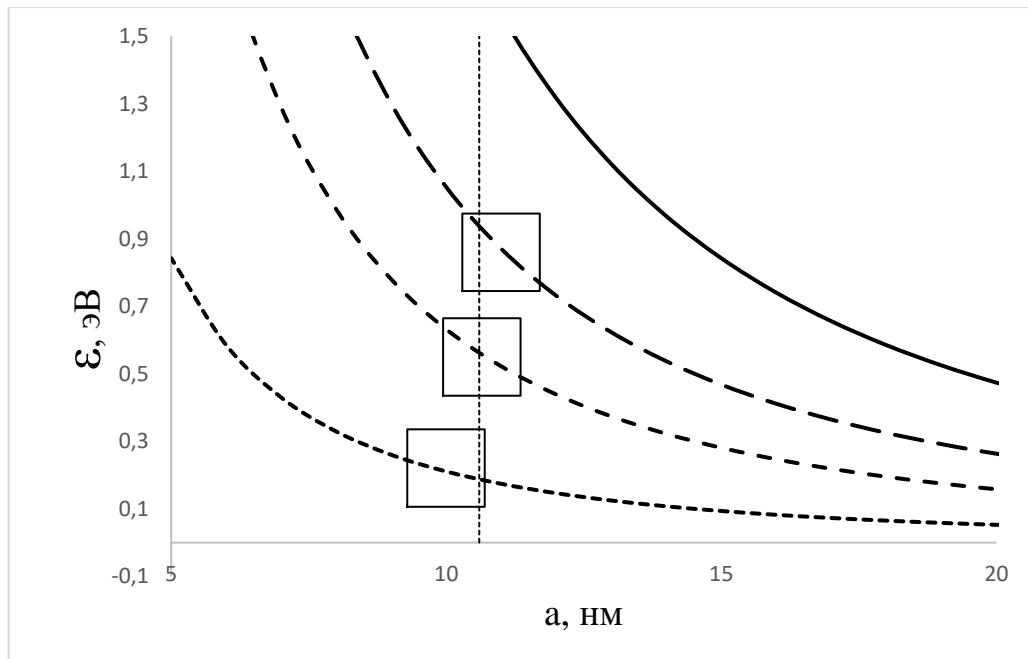


Рисунок 7. Зависимость энергии электрона от размера квантово-размерного объекта для InSb.

Заключение

В данной работе на основе анализа нормированных дифференциальных туннельных ВАХ было проведено экспериментальное исследование автоэлектронной эмиссии из выступов на поверхности образцов полупроводников группы A^3B^5 : GaAs и InSb. Для исследуемых полупроводниковых образцов GaAs и InSb наблюдаемые на дифференциальных ВАХ пики могут быть связаны с размерным квантованием энергетического спектра электронов, которое наблюдается в указанных выше материалах. Благодаря малым значениям эффективной массы электронов проводимости, размерное квантование энергетического спектра электронов может наблюдаться в условиях комнатной температуры на достаточно простых структурах, получаемых без использования сложных методик. По результатам анализа экспериментальных данных был оценен характерный размер квантового объекта на поверхности полупроводниковых образцов GaAs и InSb. Величина характерного размера квантового объекта для GaAs находится в диапазоне значений от 5.3 до 6.3 нм, а для InSb – 10.1-11.1 нм, что вполне согласуется с известными теоретическими оценками. В расчетах была использована модель кубической квантовой точки в качестве наиболее простого приближения для описания исследуемых объектов. Для интерпретации полученных результатов использовалась модель дискретного спектра энергии электрона проводимости. Наличие дискретного спектра из анализа дифференциальных ВАХ это предположение с высокой степенью состоятельности, что позволяет выдвинуть следующее предположение – исследуемые объекты являются квантово-размерными.

Список использованных источников

1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. / Российская академия наук. Институт физики микроструктур. Нижний Новгород, 2004. 110 с.
2. <https://referat.co/ref/656797/read>
3. Парфенов В.В. Квантово-размерные структуры в электронике: оптоэлектроника (элементы теории, руководство и задания к лабораторным работам). Методическое пособие для студентов физического факультета. Казань. 2007. 16 с.
4. Фурсей Г. Н. Автоэлектронная эмиссия: Сорровский образовательный журнал, том 6 №11, 2000.
5. Михайлов А. И., Кабанов В. Ф., Глуховской Е. Г. Исследование особенностей спектра квантовых точек полупроводника CdSe. Письма в ЖТФ, том 42 №15, 2016.
6. Михайлов А. И., Кабанов В. Ф., Жуков Н. Д. Проявление размерного квантования на выступах шероховатой поверхности полупроводников группы АЗВ5. Письма в ЖТФ, том 41 №21, 2015.
7. Сканирующий зондовый микроскоп. НАНОЭДЬЮКАТОР-I: Руководство по эксплуатации. 2012. Copyright © "НТ-МДТ". <http://www.ntmdt.ru>
8. Физические основы методов исследования наноструктур и поверхности твердого тела: Учебное пособие / В.И. Троян, М.А. Пушкин, В.Д. Борман, В.Н. Тронин; под ред. В.Д. Бормана: М.: МИФИ, 2008. 260 с.
9. Усанов Д. А., Скрипаль А. В. У74 Физические основы нанoeлектроники. Учебное пособие для студентов факультета нано- и биомедицинских технологий. — Саратов, 2013. — 128 с. : ил. Электронное издание.

10. Троян В. И., Пушкин М. А., Борман В. Д. Физические основы методов исследования наноструктур и поверхности твердого тела: Учебное пособие. Москва, 2008.