

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

**Анализ механизма проводимости квантовых точек InSb на основе  
теории автоэлектронной эмиссии**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 202 группы

направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Рухлова Никиты Андреевича

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.** 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  $\sim 1$  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 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.

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

Целью магистерской работы является изучение механизма проводимости полупроводниковых структур с квантовыми точками InSb при значениях напряженности электрического поля от  $2,83 \cdot 10^9$  В/м до  $4,56 \cdot 10^9$  В/м адекватно описывается теорией автоэлектронной эмиссии Моргулиса-Стрэттона из полупроводникового материала.

**Положение, выносимое на защиту.** Показано, что механизм проводимости полупроводниковых структур с квантовыми точками InSb при значениях напряженности электрического поля от  $2,83 \cdot 10^9$  В/м до  $4,56 \cdot 10^9$  В/м адекватно описывается теорией автоэлектронной эмиссии Моргулиса-Стрэттона из полупроводникового материала.

**Структура магистерской работы.** Кроме ВВЕДЕНИЯ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ, СПИСКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ и ПРИЛОЖЕНИЙ работа включает 6 основных раздела:

1. Квантовые точки;
2. Туннельный эффект;
3. Автоэлектронная эмиссия;
4. Сканирующая туннельная микроскопия;
5. Практическая часть;
6. Исследование и анализ полученных результатов.

**В разделе 1** был проведен анализ литературы по сопутствующим данной работе темам. Внимание уделялось квантовым точкам, а именно видам квантовых точек, их квантово-размерным свойствам и области их применения.

**В разделе 2** рассматривалось туннелирование, а также было представлено квантово-механическое описание туннельного эффекта.

**Раздел 3** посвящен понятию автоэлектронной эмиссии. Указан механизм автоэлектронной эмиссии, введено понятие потенциального барьера. Была описана теория Фаулера-Нордгейма для автоэлектронной эмиссии из полупроводникового материала.

**В разделе 4** представлены измерения, проводившиеся посредством использования метода сканирующей туннельной микроскопии, что показано в этом разделе.

**В разделе 5.1** в качестве объектов исследования были выбраны квантовые точки группы АЗВ5 (соединение InSb). Квантовые точки были синтезированы по методике, описанной в работах [1, 2]. В качестве стабилизаторов использовался триоктилфосфин (TOP) для раствора КТ InSb. Исходные коллоидные растворы КТ предварительно подвергались очистке от избыточного количества стабилизатора, не связанного с КТ, путем

фильтрации с использованием полиэтилена высокой плотности в качестве мембраны [3]. Для формирования монослойной структуры и для предотвращения агрегации КТ друг с другом, в исходные коллоидные растворы квантовых точек InSb был добавлен хлороформ.

Для формирования макрообъектов – полупроводниковых образцов с упорядоченными структурами, состоящими из нанобъектов (квантовых точек) многообещающими являются технологии, использующие эффекты самоорганизации, когда структуры определенных размеров формируются сами, под влиянием внутренних сил, действующих в процессе роста. К числу таких технологий относится технология Ленгмюра-Блоджетт (рисунок 1, 2).

Пленки Ленгмюра-Блоджетт образуются, когда амфифильные молекулы, такие как поверхностно-активные вещества (ПАВ) взаимодействуют с воздухом на границе раздела воздух-вода. ПАВ имеют несимметричное строение молекулы, которая состоит из полярных и неполярных групп (рисунок 3). При помещении ПАВ на поверхность воды его молекулы самопроизвольно образуют ориентированный монослой на поверхности раздела фаз в соответствии с условием уменьшения энергии Гиббса в системе: полярные группы располагаются в водной фазе, а гидрофобные радикалы вытесняются из водной среды и переходят в менее полярную фазу – воздух. В этот момент молекулы на поверхности располагаются хаотически. После распределения ПАВ по поверхности водной фазы с помощью барьеров уменьшается площадь поверхности воды, распределенные по поверхности воды молекулы сжимаются и создается тонкая пленка.

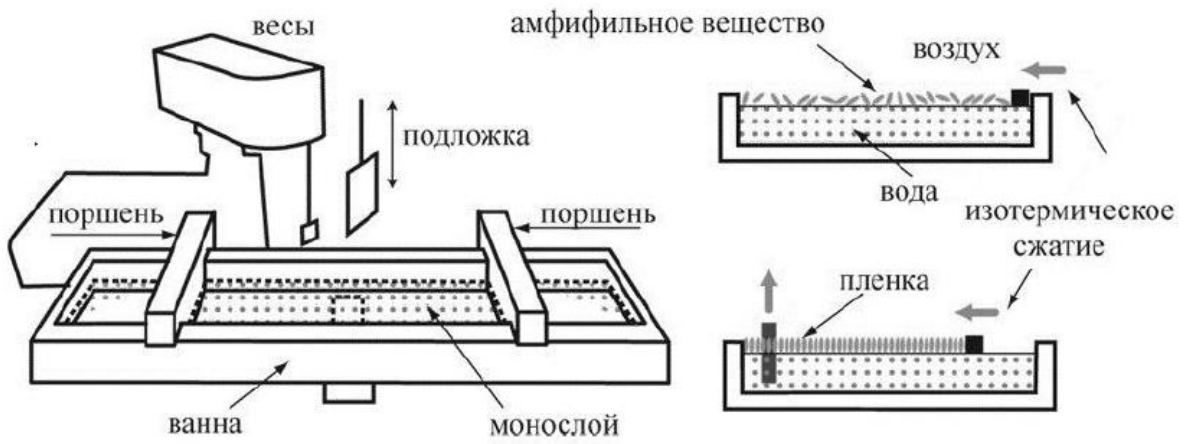


Рисунок 1 – Формирование пленки Ленгмюра-Блоджетт.

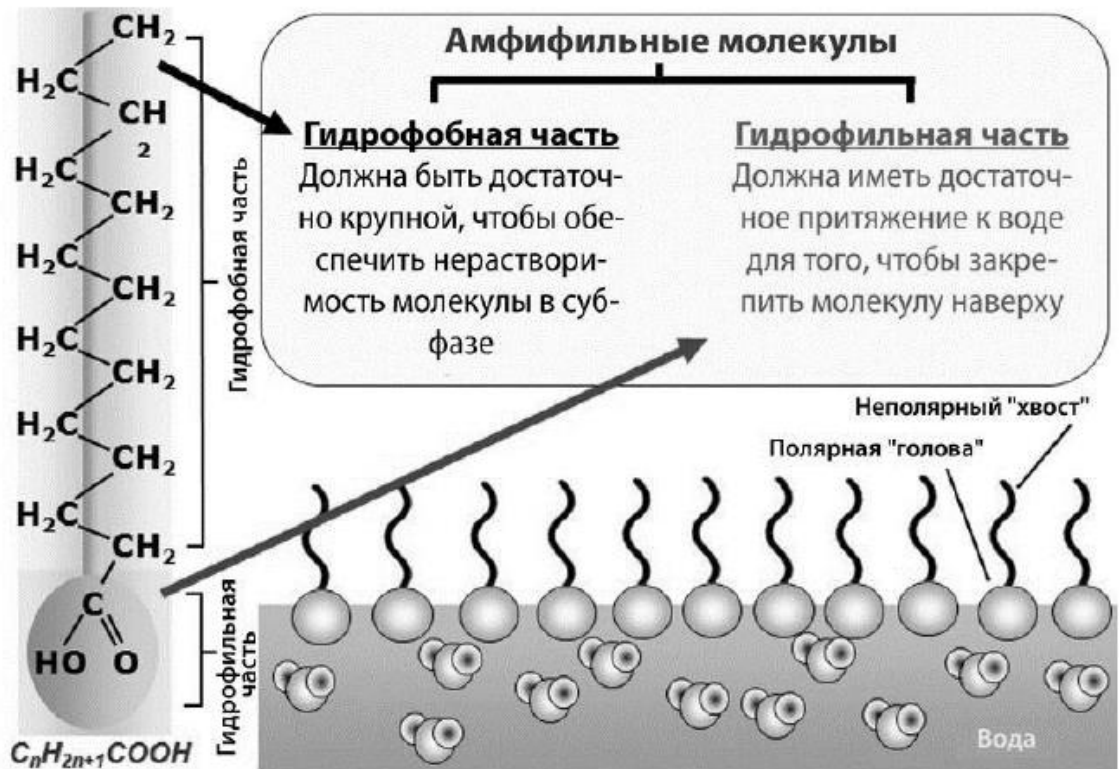


Рисунок 2 – Структура молекулы поверхностно-активного вещества.

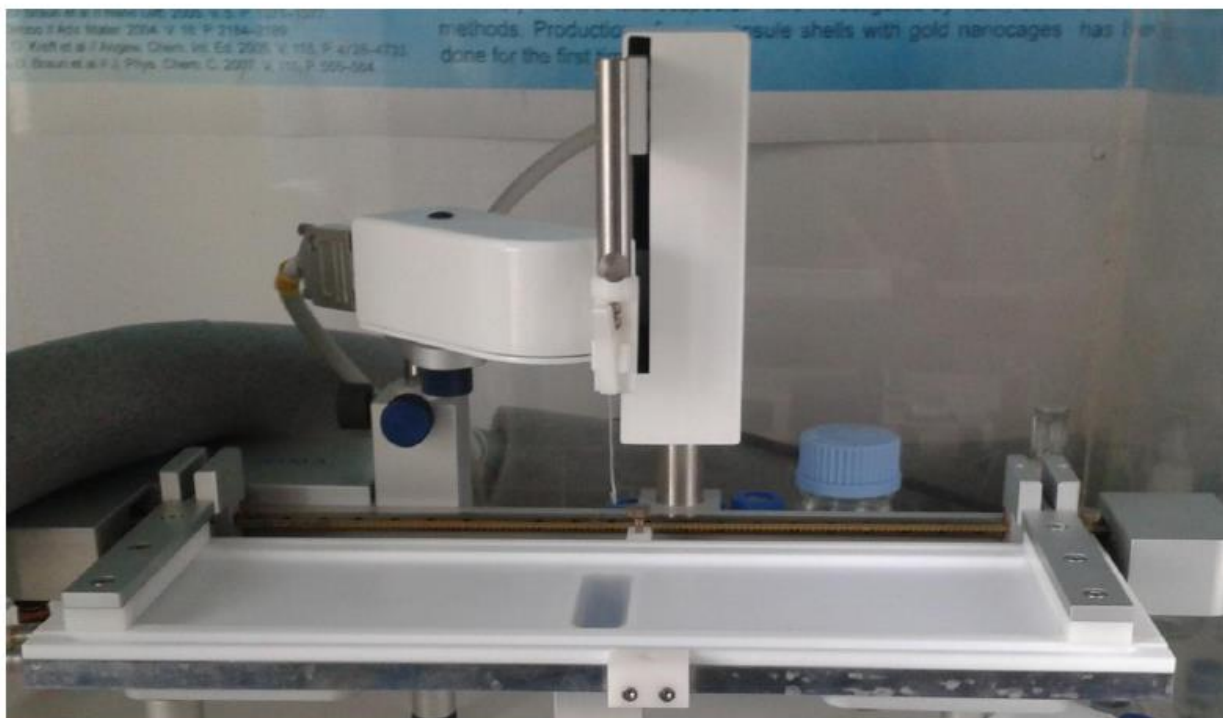


Рисунок 3 – Используемая установка – ванна Ленгмюра-Блоджетт.

В разделе 5.2 указано описание методики измерений. Измерения проводились при помощи метода СТМ на сканирующем туннельном микроскопе «НАНОЭДЬЮКАТОР II». В основе работы СЗМ НАНОЭДЬЮКАТОР II используется зависимость величины токового взаимодействия между поверхностью исследуемого образца и зондом в виде заостренной платино-иридиевой иглы. Процесс детектирования туннельного тока, протекающий при определенном постоянном электрическом смещении между образцом и зондом, позволяет исследовать исключительно проводящие объекты. Пространственное разрешение определяется такими параметрами как радиус закругления кончика зонда, уровень тепловых дрейфов конструкции и механических вибраций, а также уровень электронного шума измерительной аппаратуры. Наконечник платино-иридиевой иглы имеет определенный радиус закругления вершины порядка 1 нм [4].

На рисунке 4 изображена функциональная блок-схема СЗМ НАНОЭДЬЮКАТОР II, которая состоит из СЗМ контроллера, базового блока, измерительной головки, соединительных кабелей, а также ПК.

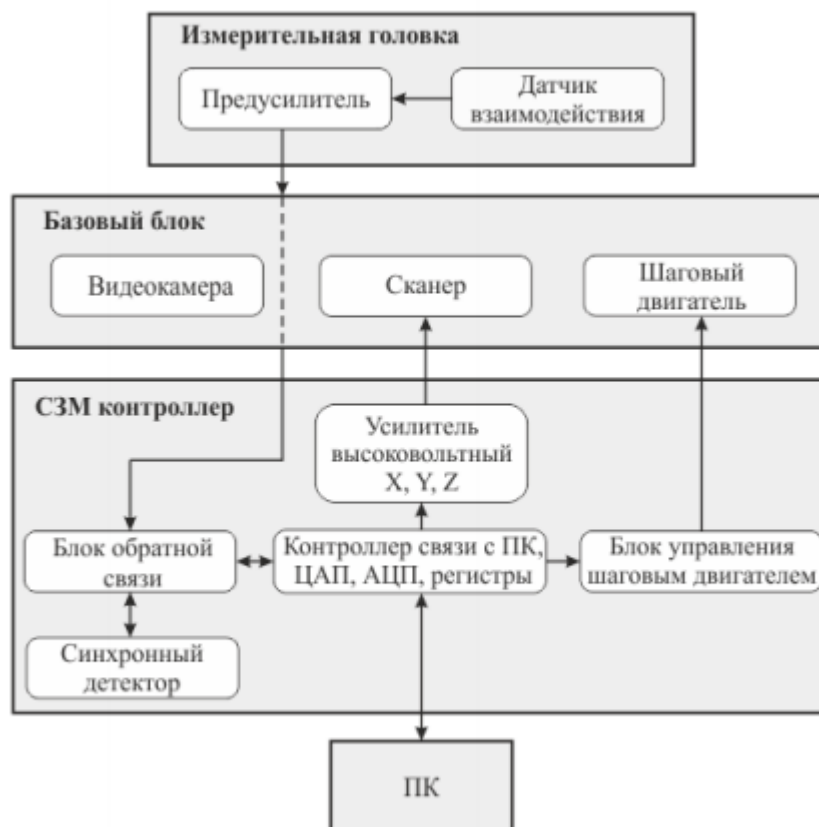


Рисунок 4 – Функциональная схема прибора.

В предусилитель поступает сигнал от датчика взаимодействия, после чего преобразованный сигнал поступает в СЗМ-контроллер через базовый блок. Затем, в базовый блок поступают управляющие сигналы, исходящие от СЗМ контроллера. Компьютер необходим для осуществления управления СЗМ контроллером при помощи контроллера связи (рисунок 5).

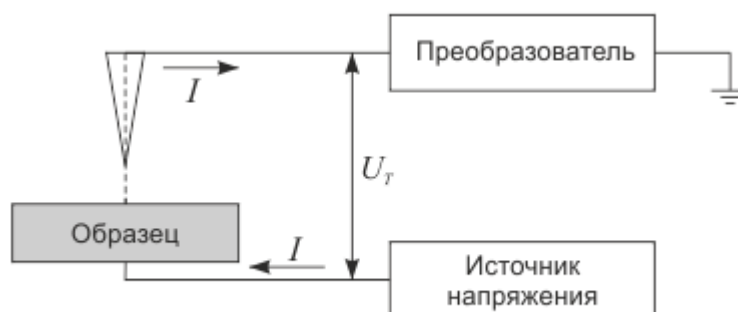


Рисунок 5 – Принцип регистрации туннельного тока.

Между проводящим зондом и проводящим образцом прикладывается разность потенциалов. Это необходимо для регистрации туннельного тока.



Преобразователь, который располагается в измерительной головке изображенной на рисунке 5, вырабатывает определенное электрическое напряжение  $U_T$ , которое обуславливает успешное протекание туннельного тока  $I$ , и выдает пропорциональное току напряжение  $U$  в электронный блок (Рисунок 5) [5].

**В разделе 5.3** представлены результаты проводившихся измерений. При помощи метода СТМ были получены экспериментальные туннельные вольт-амперные характеристики квантовых точек InSb. Для исследования и анализа были использованы 4 типичные туннельные ВАХ, представленные на рисунке 19:

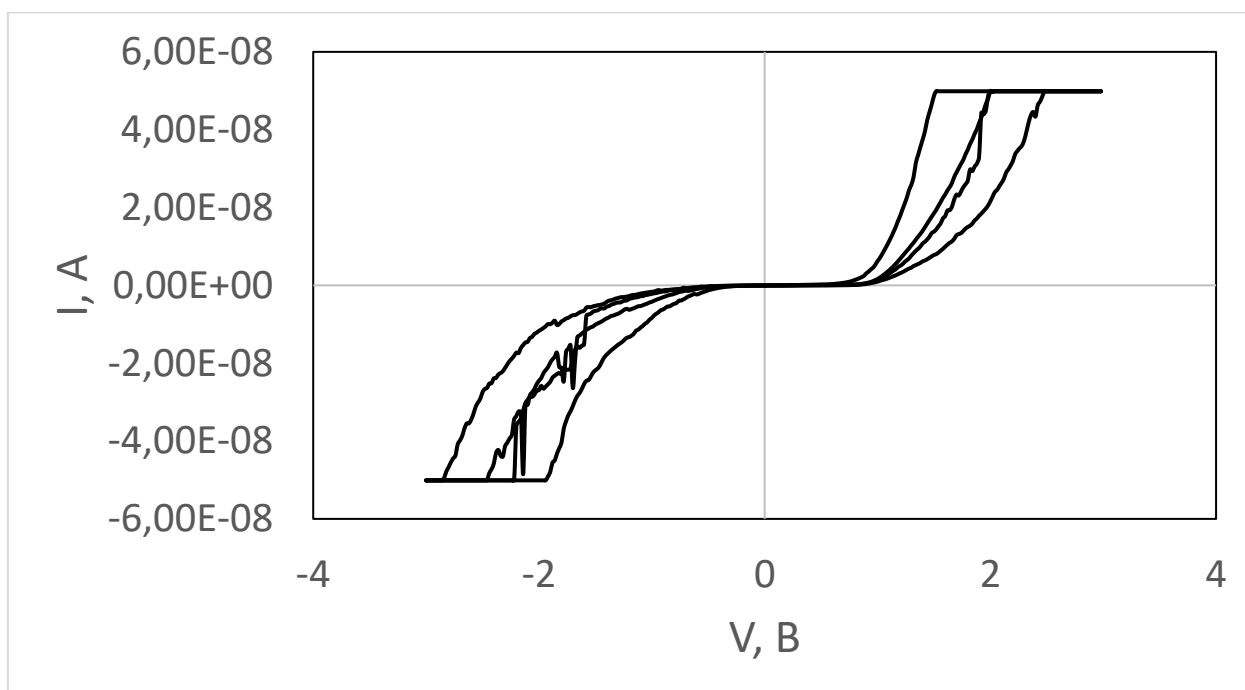


Рисунок 6 – Типичные экспериментальные туннельные ВАХ КТ InSb.

Характерные «отсечки» при значении тока 50 нА (рисунок 6) обусловлены особенностями туннельного микроскопа [2], а именно максимально допустимыми значениями туннельного тока, исследуемыми в процессе измерений.

**В разделе 6** представлены исследование и анализ полученных результатов. Характерный размер квантовых точек InSb составил 5 нм. Так как характерный размер КТ существенно меньше длины волны де Бройля для

InSb, можно с уверенностью утверждать, что исследуемые точки являются квантово-размерными объектами. (рисунок 6) [7].

Интерес в данном исследовании представляет обратная ветвь типичного туннельного ВАХ, соответствующая эмиссии электронов из полупроводника в металл (зонд). Интересующие нас линейные участки типичных туннельных ВАХ находились в диапазоне значений напряженности электрического поля от  $2,83 \cdot 10^9$  В/м до  $4,56 \cdot 10^9$  В/м и были построены в координатах  $(\ln I - V^{-1})$  (рисунок 7) [8].

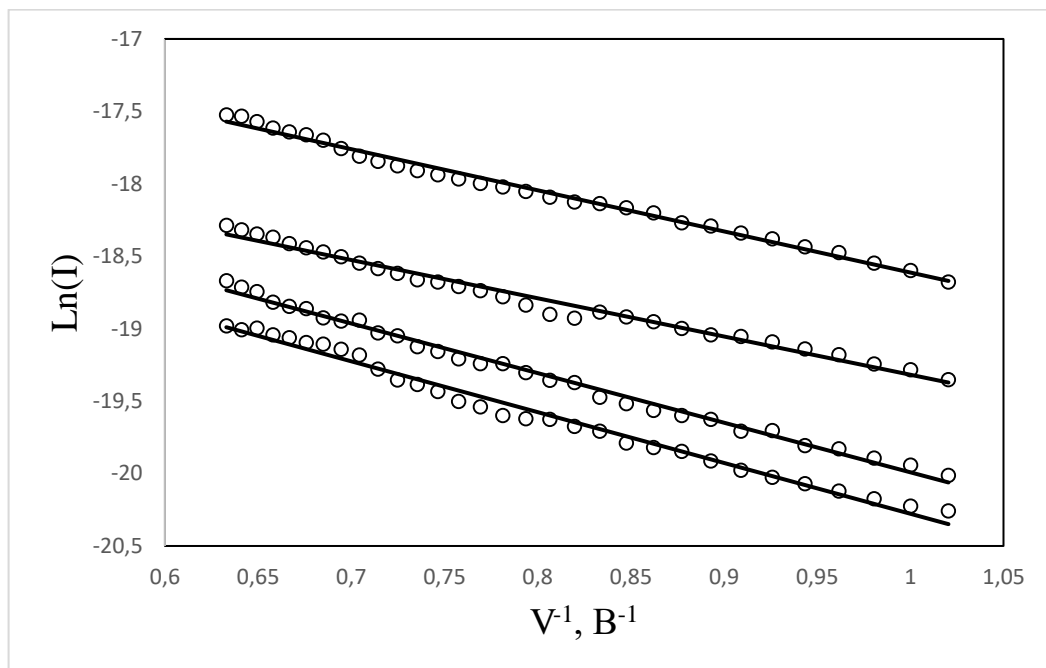


Рисунок 7 – Типичные ВАХ в координатах  $\ln(I)$  от  $V^{-1}$ .

Для интерпретации экспериментальных результатов ВАХ использовались представления об автоэмиссии из полупроводников по теории Моргулиса-Стрэттона:

$$j_s = qn_0 \left( \frac{kT}{2\pi m_0} \right)^{1/2} e^{-\frac{8\pi\sqrt{2m_*A_s^3}}{3hqE}\theta} \quad (1)$$

где  $m_0$  — масса электрона;

$m_*$  - эффективная масса электрона;

$\theta$  — значения функции Нордгейма;

$A_s$  — работа выхода электронов из полупроводника;

$E$  — локальная напряженность электрического поля;

$n_0$  — концентрация электронов в объеме полупроводника;

$q$  — модуль заряда электрона.

Были построены теоретические линейные ВАХ для InSb, которые ставились в соответствие экспериментально полученным данным (рисунок 8).

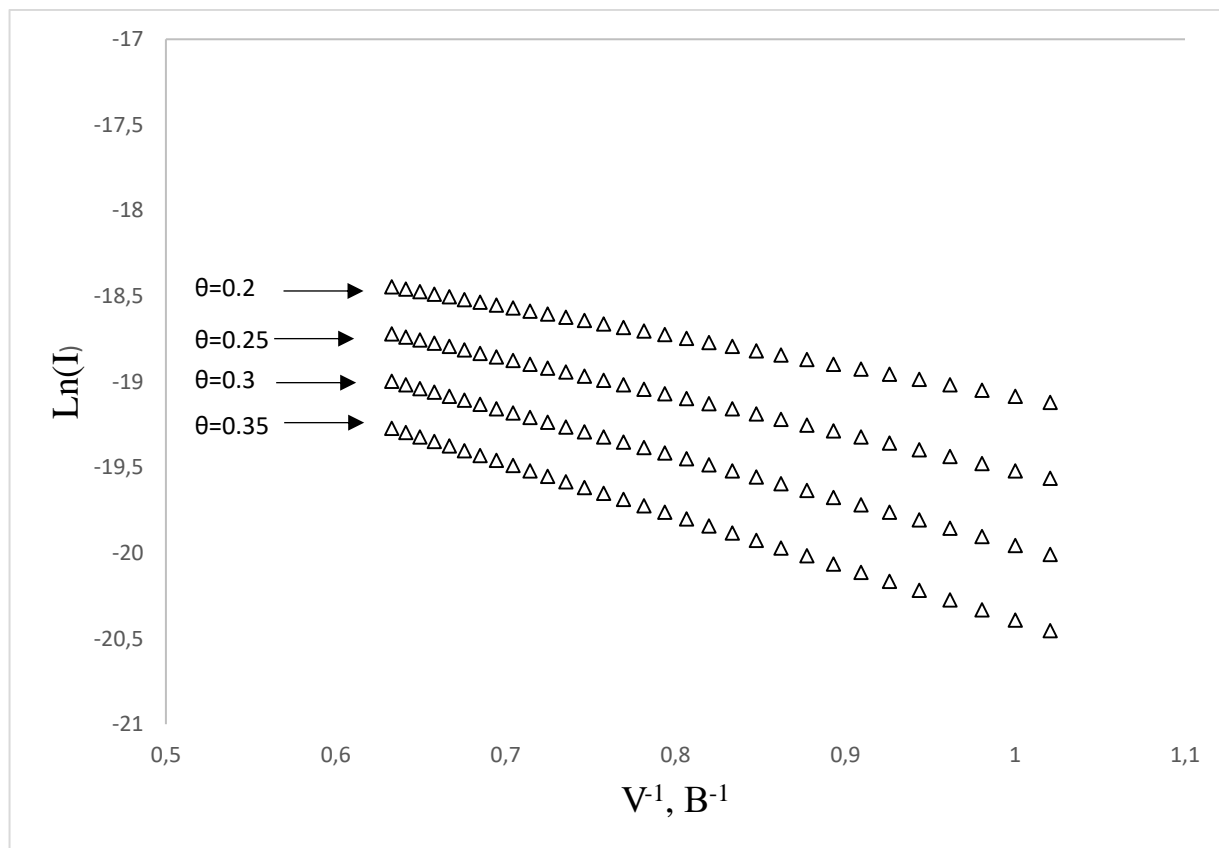


Рисунок 8 – Теоретически рассчитанные линейные ВАХ InSb в соответствии с теорией автоэлектронной эмиссии Моргулиса-Стрэттона.

Значение работы выхода электронов для материала InSb выбиралось равным 4,9 эВ, а расстояние между зондом и квантовой точкой - 1 нм. Использование рассчитанных (рисунок 8) и известных литературных значений и данных позволило оценить  $\theta$  – величину функции Нордгейма, которая учитывает степень понижения потенциального барьера. Для квантовых точек InSb она оказалась порядка  $(2,0-3,5) \cdot 10^{-1}$ , что значительно меньше, чем значение функции  $\theta$  в случае эмиссии электронов из металла (0,7 – 0,9), полученные значения являются характерными значениями для эмиссии из полупроводникового материала [2]. Анализ полученных экспериментальных и расчетных данных позволяет выдвинуть предположение, что

полупроводниковая квантовая точка в некотором смысле выполняет ту же функцию, что и область пространственного заряда в приповерхностной области объемного полупроводника при автоэлектронной эмиссии. Это приводит к ослаблению напряженности локального электрического поля вблизи поверхности, эмитирующей электроны

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Таким образом, в данной работе на основе исследования и анализа типичных туннельных ВАХ КТ InSb показано, что механизм наблюдавшегося тока автоэлектронной эмиссии успешно согласуется с теорией Моргулиса-Стрэттона. Приведены численные значения функции Нордгейма, которые находятся в диапазоне от  $2 \cdot 10^{-1}$  до  $3,5 \cdot 10^{-1}$ , соответствующие экспериментальным ВАХ. Полученные численные значения функции Нордгейма для диапазона значений напряженности электрического поля от  $2,83 \cdot 10^9$  В/м до  $4,56 \cdot 10^9$  В/м на порядок меньше значений для металлов (0,7-0,9) и согласуются с аналогичными исследованиями, представленными для объемного полупроводника InSb (0,2).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Speranskaya, E. S. Preparation of Water Soluble Zinc-Blende CdSe/ZnS Quantum dots / E. S. Speranskaya, V. V. Gofman, I. Yu. Goryacheva // *Nanotechnologies in Russia*. – 2013. – V. 8. № 1-2. – P. 129-135.
- 2 Kosolapova, K. I. Purification non-aqueous solution of quantum dots CdSe-CdS-ZnS from excess organic substance-stabilizer by use PE-HD membrane / K. I. Kosolapova, A. J. K. Al-Alwani, I. A. Gorbachev, E. G. Glukhovskoy // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2015. – V. 64. – P. 1-5
- 3 Reiss, P. Core/shell semiconductor nanocrystals / P. Reiss, M. Protiere, L. Li // *Small*. – 2009. – V. 5. № 2. – P. 14-168.
- 4 Троян В. И., Пушкин М. А., Борман В. Д. Физические основы методов исследования наноструктур и поверхности твердого тела: Учебное пособие. Москва, 2008.
- 5 Власов, А. И. Электронная микроскопия : учебное пособие / А. И. Власов, К. А. Елсуков, И. А. Косолапов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. - 168 с.
- 6 Mikhailov, A. I. Electronic Properties of A<sub>2</sub>B<sub>6</sub> Quantum Dots Incorporated into Langmuir–Blodgett Films / A. I. Mikhailov, V. F. Kabanov, I. A. Gorbachev, A. V. Kazak, N. V. Usol'tseva, E. G. Glukhovskoy // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2017. - V. 81. № 12. - P. 1472–1475.
- 7 Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы наноэлектроники: Учебное пособие. М.: Университетская книга; Логос; Физматкнига, 2006. 496 с.
- 8 Елинсон М.И., Васильев Г.Ф. Автоэлектронная эмиссия / Под ред. Д.В. Зернова. М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1958. 272 с.
- 9 А.И. Михайлов, В.Ф. Кабанов, Н.Д. Жуков. Письма в ЖТФ, 41(12), 8 (2015)
- 10 Кузьменко А.П., Кузько А.Е., Тимаков Д.И. // *ЖТФ*. 2013. Т. 83. В. 2. С. 91–96.