

На правах рукописи

БАДРУТДИНОВ АЛЕКСАНДР ОЛЕГОВИЧ

**КВАНТОВЫЙ ТРАНСПОРТ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВОЙНЫХ
КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ПРИ
СВЕРХНИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2011

Диссертационная работа выполнена в Институте физики ФГАОУВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Таюрский Дмитрий
Альбертович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Тагиров Ленар Рафгатович

доктор физико-математических наук
Рязанов Валерий Владимирович

Ведущая организация: Казанский физико-технический институт
им. Е. К. Завойского КНЦ РАН

Защита диссертации состоится «28» апреля 2011 года в 14 часов 40 минут на заседании диссертационного совета Д 212.081.15 при ФГАОУВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420008, Казань, ул. Кремлевская 16, Институт физики.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Отзывы на автореферат, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан « » марта 2011 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

М.В. Еремин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Колоссальный прогресс в развитии микроэлектроники в течение второй половины двадцатого века определялся в первую очередь появлением новых технологий по созданию все более миниатюрных структур. На сегодняшний день известно большое количество искусственно созданных систем, размеры которых достаточно малы для того, чтобы в них наблюдались квантовые явления. Подобные системы получили в литературе обобщенное название квантовых точек, или искусственных атомов. К квантовым точкам можно отнести: одиночные молекулы, захваченные между электродами [1], металлические [2], сверхпроводящие [3,4] и ферромагнитные [5] наночастицы, самособирающиеся (self-assembled) квантовые точки [6], полупроводниковые горизонтальные [7] и вертикальные [8] квантовые точки, а также полупроводниковые нанопроволоки и углеродные нанотрубки [9,10,11]. Исследования каждого из указанных типов представляют обширное поле научной деятельности.

Данная работа посвящена изучению полупроводниковых квантовых точек, изготовленных на основе арсенида галлия (GaAs). Полупроводниковая квантовая точка образуется созданием в объеме полупроводника трехмерного потенциального профиля, характеризующегося наличием потенциальной ямы мезоскопических размеров, отделенной от остального пространства потенциальными барьерами. Электроны проводимости локализуются в потенциальной яме, при этом их количество может контролироваться поштучно, а энергетический спектр дискретен. Вследствие этого физика квантовых точек имеет много параллелей с атомной физикой. По аналогии с атомами, каждое разрешенное состояние электрона в квантовой точке имеет собственную энергию и волновую функцию, характеризующую пространственное распределение электронной плотности в области локализации. По мере увеличения числа электронов в квантовой точке, заполнение состояний происходит в соответствии с правилами атомной физики – правилом Хунда и принципом запрета Паули. При этом можно выделить ряд характерных особенностей квантовых точек. Локализирующий потенциал в экспериментально реализованных квантовых точках имеет квазидвумерный характер, что приводит к наблюдению отличной от реальных атомов последовательности магических чисел 2, 6, 12, 20.... Кроме того, пространственная протяженность электронных состояний в квантовой точке, на порядок большая по сравнению с реальными атомами, приводит к повышенной чувствительности спектра к магнитному полю. Для изменения орбитального основного состояния системы достаточно величины поля порядка нескольких Тесла, в то время как в атомах для аналогичных изменений необходимо поле порядка 10^5 Тесла.

Особый интерес представляет манипуляция спином локализованных электронов, в связи с возможностью использования спина в качестве бита квантовой информации. Идея квантовой информатики начала активно

развиваться в конце прошлого столетия, и было продемонстрировано, что квантовые алгоритмы имеют существенные преимущества перед стандартными [12]. В 1998 году в работе [13] была предложена идея построения квантового бита информации (кубита) на основе спинового состояния двух электронов, локализованных в двойной квантовой точке. Последующие исследования продемонстрировали экспериментальную возможность когерентного контроля над спиновым состоянием одно- и двухэлектронных конфигураций (см. обзорную статью [14]). Физика спиновых состояний во многом определяется взаимодействием электрона с окружением. Для электронных спинов в квантовых точках, наиболее существенными взаимодействиями с окружением являются спин-орбитальное взаимодействие и сверхтонкое взаимодействие с ядерными спинами арсенида галлия [14]. Эффекты этих взаимодействий проявляются в том, что, во-первых, спиновые состояния смешиваются, и их энергии ренормализуются, и во-вторых, происходят потеря фазы и (или) релаксация электронного спинового состояния в течение характерного времени. Потеря фазы определяется преимущественно сверхтонким взаимодействием, и происходит из-за флуктуаций магнитного поля, создаваемого ядерными спинами. Релаксация электронного спина может происходить под влиянием обоих механизмов, но при этом существенно зависит от электрон-фононного взаимодействия. Во внешнем магнитном поле фононно-индуцированные механизмы релаксации доминируют.

Быстрая потеря когерентности состояния из-за взаимодействия с окружающей средой считается одним из основных препятствий на пути использования спинового состояния электрона в квантовой точке, как квантового бита информации [13]. Релаксация электронного спина при определенных условиях может быть достаточно медленной, но потеря фазы в общем случае происходит очень быстро, за время порядка десятка наносекунд [14]. Для продления времени когерентности необходимо устранить влияние флуктуирующего ядерного поля, что может быть осуществлено поляризацией системы ядер [15]. Эксперименты по динамической поляризации ядер в квантовой точке продемонстрировали состоятельность подобного подхода, тем не менее наблюдаемый эффект был не очень значителен вследствие малости величины достижимой поляризации [16]. Максимальная экспериментально достигнутая ядерная поляризация на сегодняшний день составляет ~60% [17], при этом теория предсказывает наиболее существенные эффекты при поляризации, близкой к 100% [15]. Потенциальной возможностью проверки последнего вывода может быть охлаждение квантовой точки в область сверхнизких температур. Термическая поляризация ядер, близкая к 100%, может быть достигнута при экспериментально доступных значениях магнитного поля (к примеру, в соответствии с распределением Больцмана, при $T = 1$ мК и $B = 10$ Т, равновесная поляризация ядер ^{69}Ga , ^{71}Ga , ^{75}As составляет 0.995, 0.999 и 0.98 соответственно) [18]. Однако, ввиду технической сложности задачи, до сих пор подобных исследований не предпринималось.

Цель и задачи работы.

Судить о ядерной поляризации в полупроводниковой квантовой точке можно по величине расщепления Зеемана некоторого электронного состояния с ненулевым спином, которая в свою очередь измеряется по изменениям величины тока через точку. При этом, существенная величина тока, зависящая от высоты потенциальных барьеров точки, благоприятна для отчетливого наблюдения. В связи с этим **цели работы** можно сформулировать следующим образом: исследование образца полупроводниковой вертикальной двойной квантовой точки, имеющей относительно низкие для данного класса квантовых точек потенциальные барьеры, и попытка наблюдения в данном образце влияния термически поляризованных ядер на зарядовый транспорт при сверхнизких температурах.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

- оснащение рефрижератора растворения приставкой для ядерного адиабатического размагничивания и экспериментальной ячейкой;
- изготовление образца вертикальной двойной квантовой точки с низкими потенциальными барьерами;
- систематические исследования зарядового транспорта в образце двойной квантовой точки в интервале магнитных полей 0 – 12 Т при базовой температуре рефрижератора растворения;
- наблюдение расщепления Зеемана электронных состояний в двойной квантовой точке;
- охлаждение системы методом ядерного адиабатического размагничивания, регистрация зависимости величины расщепления Зеемана от температуры.

Методы исследований.

Исследования проводились методами, разработанными для исследования класса вертикальных двойных квантовых точек. Спектроскопия электронных состояний осуществлялась измерением электрического тока через точку в зависимости от напряжения истока-стока, управляющего напряжения и магнитного поля. Анализ результатов был выполнен в рамках модели постоянного взаимодействия [14], при этом одночастичный электронный спектр аппроксимировался спектром Фока-Дарвина.

Объектом исследований является полупроводниковая вертикальная двойная квантовая точка на основе гетероструктуры арсенида галлия с низкими потенциальными барьерами.

Исследования выполнены в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК от 24 апреля 2010 г. № 02.740.11.0797) и в рамках программы совместной аспирантуры между Казанским (Приволжским) федеральным университетом и Институтом физических и химических исследований RIKEN

(г. Вако, Япония).

Научная новизна.

В диссертационной работе впервые:

- Проведены систематические исследования полупроводниковой вертикальной двойной квантовой точки на основе арсенида галлия, имеющей низкие потенциальные барьеры.
- В исследованной двойной квантовой точке наблюдаются области диаграммы зарядовой стабильности, в которых зарядовый транспорт определяется механизмами сотуннелирования.
- Обнаружено, что величина расщепления Зеемана зависит от орбитального состояния, что свидетельствует о существенной величине спин-орбитального взаимодействия в квантовой точке с низкими барьерами.
- Предпринята попытка охлаждения полупроводниковой квантовой точки методом ядерного адиабатического размагничивания.

Научная и практическая значимость работы.

Диссертационная работа является вкладом в исследования полупроводниковых квантовых точек, являющиеся на сегодняшний день «горячей» темой и проводимые во многих ведущих научных институтах во всем мире. В силу этого обстоятельства научная значимость полученных в работе результатов несомненна. Практическая значимость работы заключается в получении новых систематических данных о классе вертикальных двойных квантовых точек. На данный момент конкретные рецепты по внедрению полупроводниковых квантовых точек в коммерческие технологии пока отсутствуют. Тем не менее, следует отметить, что во-первых, имеет место глобальная перспектива реализации квантовой информатики на основе данных устройств. Во-вторых, наблюдаемое конкретно в исследуемом в работе образце сильное спин-орбитальное взаимодействие является необходимым для создания спинового полевого транзистора, что может послужить практической реализации новой развивающейся области науки спинтроники.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

- Зарядовый транспорт через полупроводниковую вертикальную двойную квантовую точку с низкими потенциальными барьерами адекватно описывается в рамках модели постоянного взаимодействия в приближении одночастичного спектра Фока-Дарвина.
- На диаграмме зарядовой стабильности исследуемой двойной квантовой точки имеют место области, в которых зарядовый транспорт определяется механизмами сотуннелирования.
- Обнаружено различие в величинах расщепления Зеемана орбитальных состояний электрона, являющееся результатом сильного спин-орбитального взаимодействия, возникающего вследствие обусловленной

низкими потенциальными барьерами большой протяженности волновых функций локализованных в квантовой точке электронов в области прилегающих слоев гетероструктуры.

- Охлаждение полупроводниковой вертикальной квантовой точки в область сверхнизких температур нереализуемо при стандартном дизайне экспериментальной ячейки, и требует принципиально нового подхода.

Апробация работы.

Основные результаты докладывались и обсуждались на конференциях:

XXXV совещание по физике низких температур НТ-35 (Черноголовка, 29 сентября – 2 октября 2009), Юбилейная конференция «250 лет физическому образованию в Казанском образовательном округе и 50 лет физическому факультету» (Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 7-11 декабря 2010), International conference “Frontiers in nanoscale science and technology” FNST-2011 (Japan, Wako, January 5-7, 2011), International symposium on nanoscale transport and technology ISNTT-2011 (Japan, Atsugi, January 11-14, 2011).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 5 работ, из них 2 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень научных изданий ВАК, рекомендованных для публикации основных результатов диссертации, и 3 работы в сборниках трудов российских и международных конференций.

Личный вклад автора.

Создание установки для измерений при сверхнизких температурах, участие в изготовлении образцов вертикальных двойных квантовых точек, проведение измерений зарядового транспорта, обработка, анализ и обсуждение полученных результатов.

Объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 126 страниц машинописного текста, включая 40 рисунков, 1 таблицу и библиографию из 125 наименований.

Краткое содержание диссертации.

Во введении обосновывается актуальность работы, поставлена цель и сформулированы задачи исследования.

В главе 1 приводится обзор основных результатов исследований полупроводниковых квантовых точек на основе арсенида галлия. Экспериментально реализованные квантовые точки по геометрии структуры подразделяются на 2 класса: вертикальные и горизонтальные. Особенностью

вертикальных квантовых точек является простота контроля над числом локализованных электронов, а также высокая симметрия системы. Горизонтальные квантовые точки дают возможность более гибкой подстройки потенциального профиля, а также возможность неинвазивного измерения зарядового состояния. Энергетический спектр электронов в квантовой точке определяется во-первых, локализацией в потенциальной яме, а во-вторых, электростатическими взаимодействиями электронов в точке между собой, с резервуарами и управляющими электродами. Простейшая теоретическая модель, учитывающая эти факторы независимо друг от друга, носит название модель постоянного взаимодействия (constant interaction model) [14]. Энергия и химический потенциал N -электронного состояния точки записываются как:

$$U(N) = \frac{[-|e|(N - N_0) + C_s V_s + C_d V_d + C_g V_g]^2}{2C} + \sum_{n=1}^N E_n(B) \quad (1)$$

$$\mu(N) \equiv U(N) - U(N-1) = \left(N - N_0 - \frac{1}{2}\right) E_C - \frac{E_C}{|e|} (C_s V_{sd} + C_g V_g) + E_N \quad (2)$$

где e – заряд электрона, $N_0|e|$ – заряд в точке, компенсирующий положительный фоновый заряд доноров в гетероструктуре, $C_s V_s$, $C_d V_d$, $C_g V_g$ представляют эффективный заряд, индуцированный истоком, стоком и управляющим электродом соответственно, суммирование $\sum E_n(B)$ ведется по занятым энергетическим уровням, энергия которых зависит от внешнего магнитного поля B , $E_C = e^2/C$ – изменение электростатической энергии точки при добавлении одного электрона, $C = C_s + C_d + C_g$ – эффективная емкость точки. Во многих случаях локализуемый потенциал может быть аппроксимирован двумерным гармоническим, в этом случае уравнение Шредингера для локализованного электрона может быть решено аналитически. Решение носит название спектра Фока-Дарвина, и записывается как [8]:

$$E_{nl} = (2n + |l| + 1) \hbar \left(\omega_0^2 + \frac{\omega_c^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} l \hbar \omega_c \quad (3)$$

где n , l – главное и орбитальное квантовые числа, $\hbar \omega_0$ – энергия, связанная с локализацией в двумерном гармоническом потенциале, а $\hbar \omega_c = \hbar e B / m^*$ – циклотронная энергия, B – магнитное поле, m^* – эффективная масса электрона в арсениде галлия. Зарядовый транспорт через квантовую точку возможен в случае, когда химический потенциал некоторого электронного состояния точки по величине находится в интервале между значениями химических потенциалов истока и стока. В противном случае точка пребывает в режиме кулоновской блокады (электростатическое взаимодействие препятствует протеканию тока через точку).

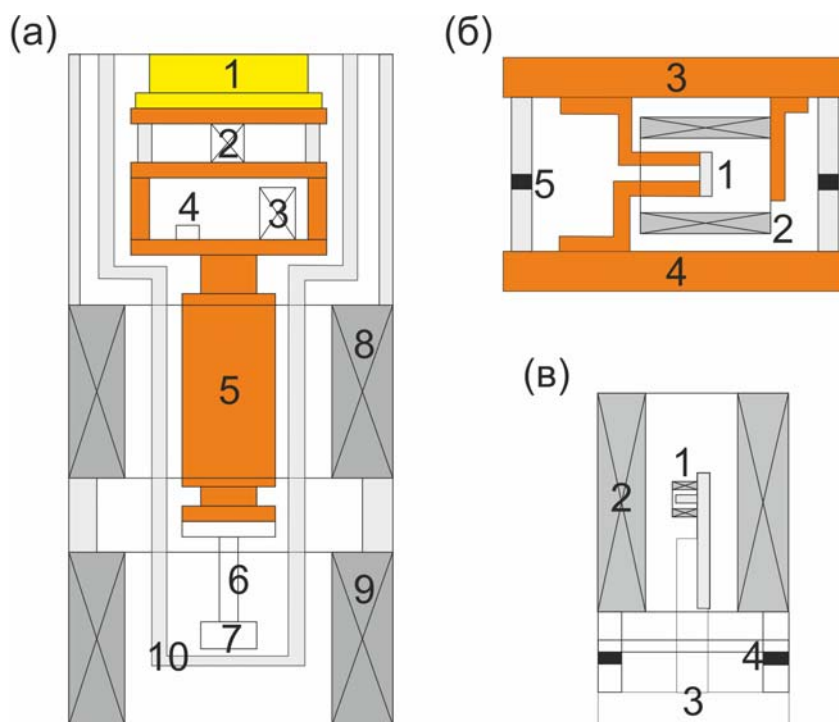
Орбитальные состояния электронов в квантовой точке двукратно вырождены по спину, и подчиняются правилам атомной физики - правилу Хунда и принципу запрета Паули. Правила отбора по спину могут оказывать существенное влияние на зарядовый транспорт через квантовую точку. Ярким примером этого является феномен спиновой блокады [19], наблюдаемый в

двойных квантовых точках при определенном зарядовом состоянии, когда одна точка пуста, а во второй локализован один электрон (зарядовое состояние $(0,1)$). При наличии напряжения между истоком и стоком, зарядовый транспорт осуществляется последовательностью зарядовых состояний $(0,1) - (1,1) - (0,2) - (0,1)$, а именно электрон из истока входит в первую точку, затем переходит во вторую, и затем из второй точки уходит в сток. Однако, в случае если в состоянии $(1,1)$ электроны оказались с одинаковыми спинами, переход $(1,1) - (0,2)$ запрещен принципом Паули, и ток через точку оказывается заблокирован, до тех пор, пока не произойдет релаксация одного из спинов.

Релаксация электронного спина в квантовых точках происходит посредством взаимодействия с магнитным окружением. Наиболее значительными взаимодействиями являются спин-орбитальное взаимодействие, а также сверхтонкое взаимодействие с ядерными спинами арсенида галлия (^{69}Ga , ^{71}Ga , ^{75}As). В нулевом магнитном поле (в общем случае, когда электронные состояния вырождены), релаксация происходит преимущественно посредством взаимных переворотов электронных и ядерных спинов за счет сверхтонкого взаимодействия. В ненулевом поле взаимные перевороты могут происходить только с рассеянием энергии в резервуар фононов, и скорость релаксации зависит от величины спин-фононного взаимодействия. При этом связь спиновых состояний с колебаниями решетки определяется спин-орбитальными и сверхтонкими взаимодействиями. Взаимодействия с окружением также приводят к расфазировке электронного спинового состояния. Потеря фазы определяется преимущественно сверхтонким взаимодействием, и происходит из-за флуктуаций магнитного поля, создаваемого ядрами на электроде.

Явление спиновой блокады, в совокупности с возможностью релаксации электронного спина посредством сверхтонкого взаимодействия, обеспечивают экспериментально реализуемый механизм динамической поляризации ядер [20]. Зарядовое состояние $(1,1)$, в котором двойная квантовая точка пребывает в режиме спиновой блокады, является спиновым триплетом ($S=1$), трехкратно вырожденным в отсутствие внешнего магнитного поля. Магнитное поле снимает это вырождение, и при определенном значении поля оказывается, что энергия триплетного состояния с ненулевым магнитным квантовым числом ($+1$ или -1), совпадает с энергией спинового синглета с магнитным квантовым числом, равным 0. Таким образом становится возможна релаксация спинового триплетного состояния в синглет напрямую, с одновременным переворотом некоторого ядерного спина. Спиновая блокада при этом снимается, и происходит зарядовый транспорт через квантовую точку в последовательности состояний $(1,1) - (0,2) - (0,1) - (1,1)$, до тех пор, пока состояние $(1,1)$ вновь не окажется спиновым триплетом. Таким образом, релаксация триплетного состояния в синглет описанным выше образом имеет циклический характер. При этом изменение ядерного магнитного квантового числа для каждого акта релаксации имеет одинаковый знак, что в результате приводит к возникновению динамической поляризации ядерных спинов, величина которой может достигать до 40% [20].

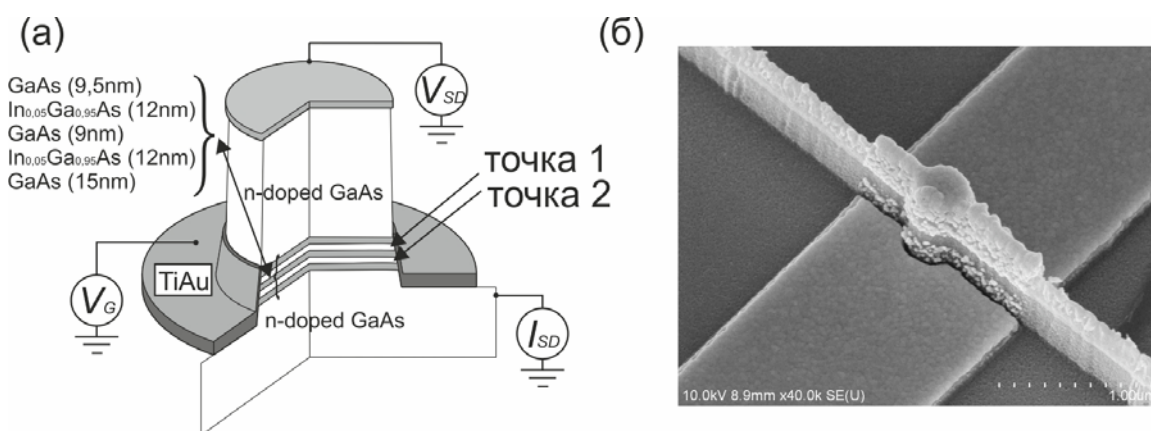
В главе 2 описывается экспериментальная установка и исследуемый образец. Установка представляет собой рефрижератор растворения, оснащенный приставкой для ядерного адиабатического размагничивания (рис. 1а). Базовая температура рефрижератора растворения 10 мК, размагничивание позволяет достигать порядка 0.4 мК. Камера смешения рефрижератора растворения и приставка для размагничивания соединены посредством теплового ключа (рис. 1б), представляющего собой контакт, сделанный из индия, помещенный в центр небольшого сверхпроводящего соленоида. Рефрижератор растворения оснащен карбоновым термометром, прокалиброванным до 5 мК. Для измерений в области сверхнизких температур на медную ступень приставки для размагничивания установлен платиновый ЯМР-термометр (рис. 1в). ЯМР сигнал термометра наблюдается при температуре от 10 мК и ниже, что позволяет калибровать его по карбоновому резистору рефрижератора растворения. На случай необходимости более точной калибровки, установка также оснащена термометром кривой плавления ^3He , расположенным на приставке для размагничивания рядом с ЯМР термометром.



Система оборудована двумя массивными сверхпроводящими магнитами; первый позволяет получать поле 9 Тесла и используется для размагничивания, второй позволяет получать 12 Тесла и служит для создания внешнего поля на образце. Магниты устроены и расположены так, что в области между ними магнитное поле скомпенсировано.

Для подавления шума, идущего из измерительной аппаратуры, в измерительной линии установлены широкополосные RC-фильтры, представляющие собой тонкий длинный провод, сделанный из марганца, проходящий через медный порошок. Фильтры установлены в низкотемпературной части линии, и находятся в тепловом контакте с камерой смешения рефрижератора растворения. Провода, идущие от фильтров к образцу, тщательно защищены от возможных источников шума. С целью избежать попадания внешнего высокочастотного шума в измерительную линию, криостат со всеми приборами помещен в защищенную комнату (shielded room). Подключение всей измерительной аппаратуры к сети осуществляется через LC-фильтры.

Исследуемый образец представляет собой вертикальную двойную квантовую точку (рис. 2). Области локализации электронов сделаны из $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{As}$, области, формирующие потенциальные барьеры – из GaAs, что обеспечивает высоту барьера ~ 20 мэВ, электронные резервуары – из GaAs, допированного Si, управляющий электрод – из TiAu.

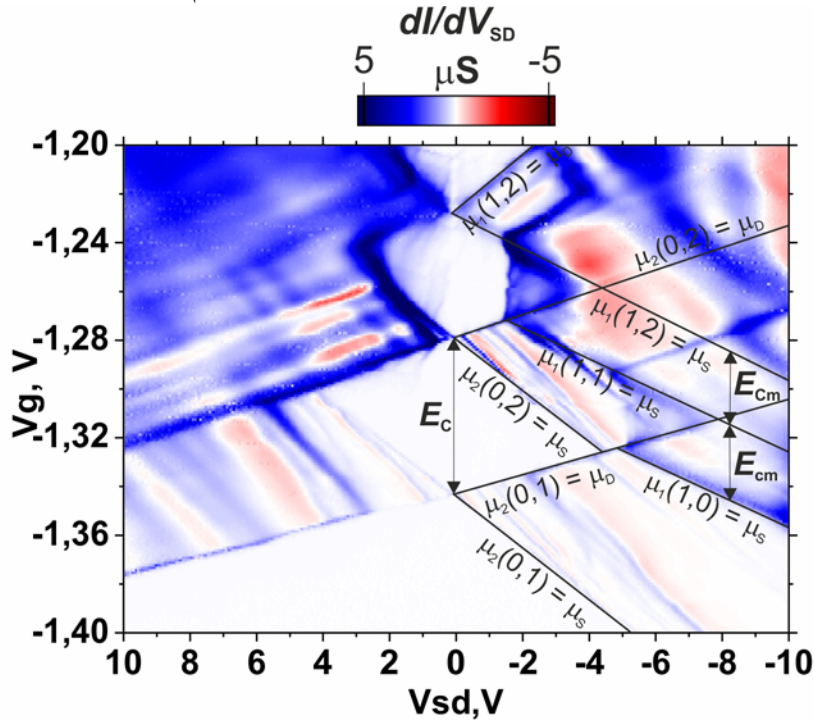


В главе 3 производится детальный анализ диаграммы зарядовой стабильности исследуемого образца в отсутствии магнитного поля и описываются эффекты сотуннелирования. В рамках модели постоянного взаимодействия химические потенциалы точек 1 и 2 двойной точки в различных зарядовых состояниях можно записать как:

$$\mu_1(N_1, N_2) = (N_1 - \frac{1}{2})E_C + N_2 E_{Cm} - \alpha_1 V_S - \beta_1 V_D - \gamma_1 V_G + E_{N_1} \quad (4)$$

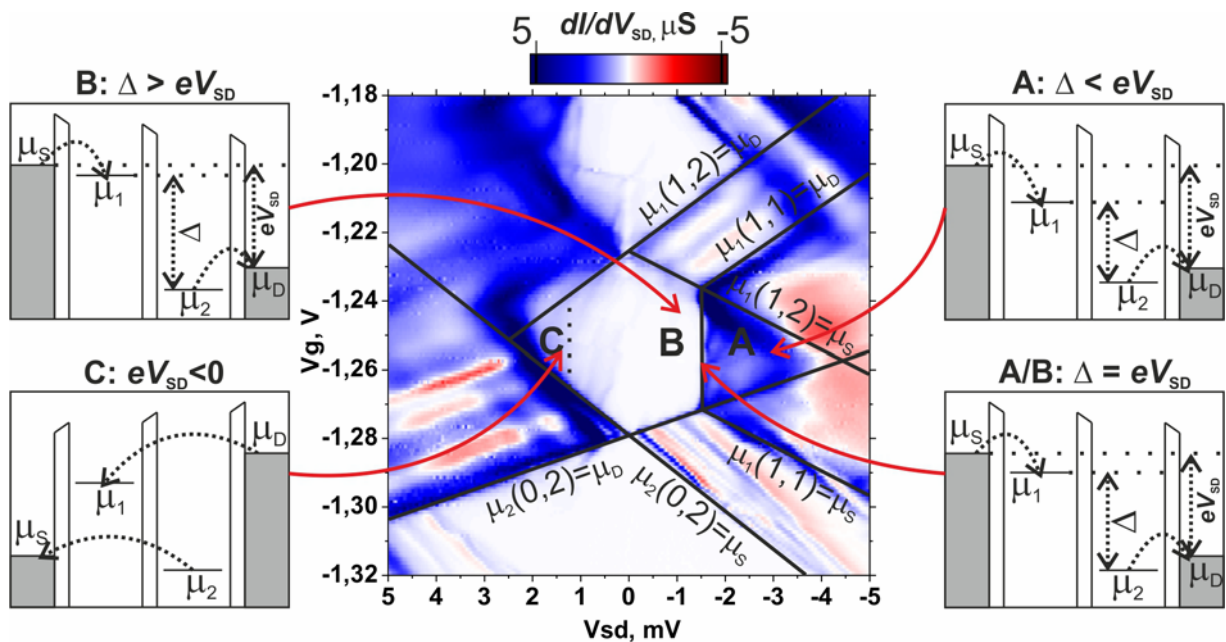
$$\mu_2(N_1, N_2) = (N_2 - \frac{1}{2})E_C + N_1 E_{Cm} - \alpha_2 V_D - \beta_2 V_S - \gamma_2 V_G + E_{N_2}$$

Здесь N_1, N_2 – количество электронов, локализованных в точках 1 и 2, $V_{S(D)}$ – напряжение истока (стока), V_G – напряжение управляющего электрода, E_{Ni} – энергия электронного состояния, занимаемого N -м электроном в i -й точке, E_C, E_{Cm} – энергии электростатического взаимодействия электрона внутри точки и между точками, α, β, γ – коэффициенты электростатического взаимодействия с электродами. На диаграмме зарядовой стабильности (рис. 3) области кулоновской блокады ограничены линиями, характеризующими ступенчатое изменение тока, вызванное выполнением условия равенства химических потенциалов $\mu_i(N_1, N_2) = \mu_{S(D)}$. Наблюдаемые линии позволяют сопоставить определенные области диаграммы зарядовой стабильности характерным конфигурациям химических потенциалов точек и резервуаров. На основе сопоставления определены параметры $E_C, E_{Cm}, \alpha, \beta, \gamma$, входящие в выражения для химических потенциалов.



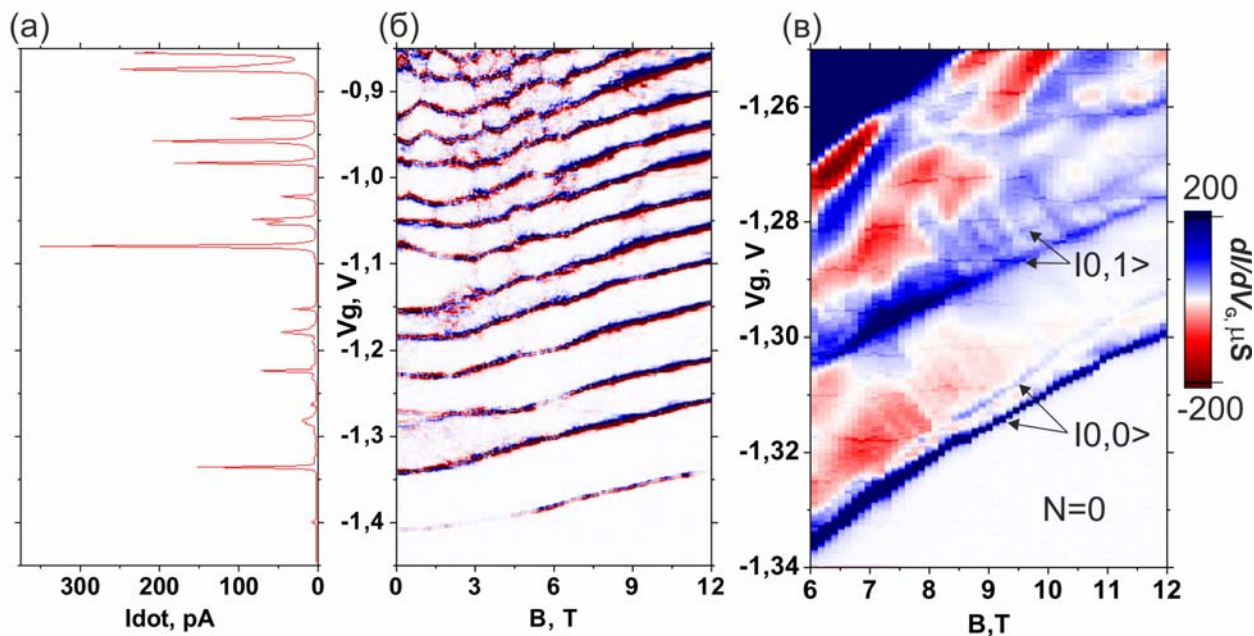
Особенностью диаграммы зарядовой стабильности исследуемой квантовой точки является наличие областей ненулевого тока в режиме кулоновской блокады (рис. 4). В рамках модели постоянного взаимодействия невозможно объяснить природу этого явления. Нами предложено объяснение в

рамках механизма сотуннелирования, описанного прежде для одиночной вертикальной квантовой точки [21]. Для области кулоновской блокады, изображенной на рисунке 4, при условии выполнения соотношения $\mu_S - \mu_D > \mu_1(1,1) - \mu_2(0,2)$, энергетически возможен процесс второго порядка, при котором электрон из точки 2, находящийся в режиме кулоновской блокады, переходит в сток одновременно с переходом электрона из истока в точку 1. Выполнение упомянутого условия не зависит от управляющего напряжения, поэтому граница характерной области должна быть вертикальной линией на диаграмме зарядовой стабильности, что и наблюдается экспериментально. В случае сотуннелирования в двойной квантовой точке, асимметрия уровней химических потенциалов состояний, участвующих в сотуннелировании относительно знака напряжения истока-стока приводит к тому, что область сотуннелирования наблюдается либо при положительном, либо при отрицательном напряжении. Это является существенным отличием от случая одиночной точки, где наблюдаемые области сотуннелирования симметричны относительно знака напряжения истока-стока.



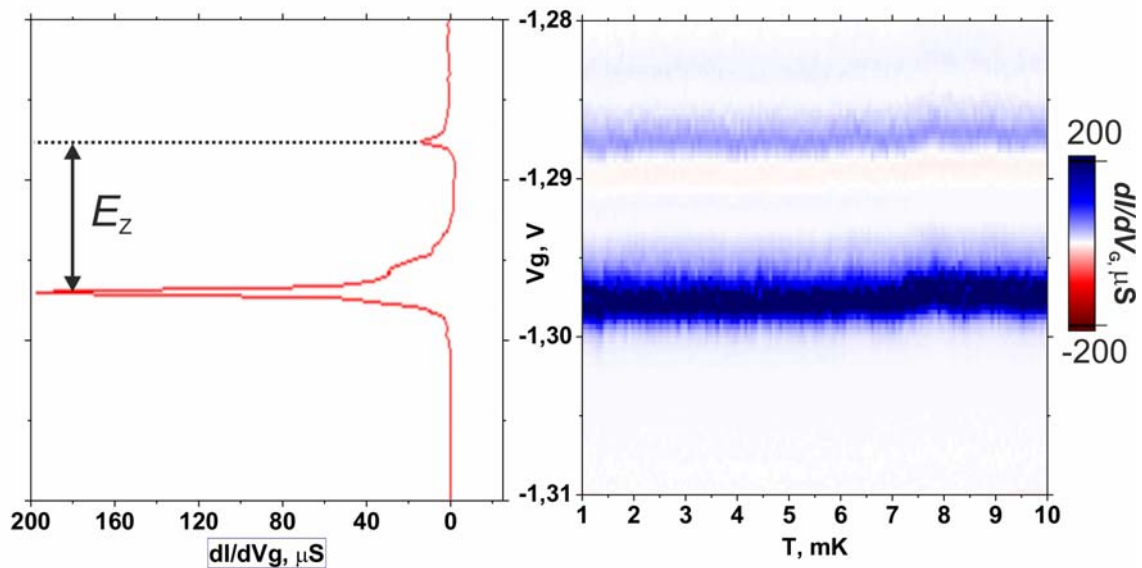
В главе 4 описывается зарядовый транспорт через квантовую точку при наличии внешнего магнитного поля, приложенного перпендикулярно плоскости гетероструктуры. Зависимость спектра одночастичных состояний от магнитного поля наблюдается экспериментально по диаграмме зарядовой стабильности, а также по диаграмме тока в координатах (V_G, B) (рис. 5а,б). Анализ экспериментальных данных выполнен в приближении спектра Фока-Дарвина, и демонстрирует качественное совпадение наблюдаемых

зависимостей с теоретическими предсказаниями. Эволюция N -электронного основного состояния с изменением магнитного поля наблюдается в интервале N от 1 до 4. В совокупности с результатами анализа диаграммы зарядовой стабильности в отсутствие магнитного поля это дает полную картину об энергетическом спектре исследуемой квантовой точки в режиме малого числа локализованных электронов.



В интервале магнитных полей 6 – 12 Тесла на диаграмме зарядовой стабильности становится возможным наблюдать линии, соответствующие расщеплению Зеемана одноэлектронных основного и возбужденного орбитальных состояний квантовой точки (рис. 5в). Было обнаружено, что величина расщепления зависит от орбитального момента. С целью объяснения данного явления был выполнен теоретический анализ полученных результатов в приближении обобщенных состояний спектра Фока-Дарвина в присутствии спин-орбитального взаимодействия, и показано, что спин-орбитальное взаимодействие приводит к тому, что расщепление Зеемана основного состояния больше, чем возбужденного. Сопоставление результатов численного решения задачи с экспериментальными данными дает значение константы спин-орбитального взаимодействия большее, чем в ранее исследованных гетероструктурах на основе арсенида галлия. Объяснить подобное наблюдение

можно следующим образом. На границе гетероструктуры арсенида галлия присутствует электрическое поле. В случае, когда гетероструктура образует асимметричную потенциальную яму (в том числе при наличии приложенного перпендикулярно гетероструктуре напряжения), это электрическое поле дает конечный вклад в спин-орбитальное взаимодействие (вклад Рашба [22]), зависящий от разности квадратов амплитуд волновой функции электрона на границах. В исследуемом образце в результате малой высоты потенциальных барьеров, волновая функция локализованных электронов имеет увеличенное перекрытие со слоями гетероструктуры, образующими барьеры. Это приводит к увеличенному вкладу Рашба при наличии асимметрии, вызванной приложенным напряжением истока-стока.



Была предпринята попытка пронаблюдать поляризацию системы ядерных спинов исследуемой квантовой точки при понижении температуры во внешнем магнитном поле 12 Тесла. Понижение температуры осуществлялось методом ядерного адиабатического размагничивания от 10 мК до 1 мК, при этом непрерывно регистрировалась величина расщепления Зеемана основного орбитального одноэлектронного состояния. При температуре 10 мК в магнитном поле 12 Т, согласно распределению Больцмана, поляризация ядер арсенида галлия составляет примерно 3%. Создаваемое при этом поле Оверхаузера составляет всего 0.15 Т, таким образом при 10 мК величина расщепления Зеемана обусловлена суммарным полем 11.85 Т. При температуре 1 мК в магнитном поле 12 Т, поляризация близка к 100%, и создает

эффективное поле ~ 5 Т, суммарное поле следовательно составляет около 7 Т. Таким образом, свидетельством ядерной термической поляризации было бы изменение величины расщепления Зеемана примерно в полтора раза. Однако, в полученной экспериментальной зависимости величины расщепления Зеемана от температуры не было зарегистрировано каких-либо существенных изменений (рис. 6). Наиболее вероятным объяснением данного наблюдения является отсутствие теплового равновесия между квантовой точкой и тепловым резервуаром, по всей видимости из-за недостаточно хорошего теплообмена. Следует также отметить, что неравновесность системы ядерных спинов в полупроводниковых квантовых точках экспериментально наблюдалась в работе [23]. Вследствие перегретости точки, поляризация ядер ничтожно мала, и величина расщепления Зеемана обусловлена исключительно внешним магнитным полем, вне зависимости от температуры теплового резервуара. На основании выше сказанного сделан вывод, что стандартный дизайн экспериментальной ячейки не подходит для охлаждения квантовой точки до сверхнизких температур, и нуждается в принципиальном усовершенствовании.

Основные результаты:

- Для проведения сверхнизкотемпературных измерений выполнено оснащение рефрижератора растворения ^3He - ^4He приставкой для ядерного адиабатического размагничивания. Установка запущена, и достигнута температура 0.4 мК. Приготовлен образец вертикальной двойной квантовой точки на основе арсенида галлия с низкими потенциальными барьерами.
- Проведены систематические исследования полупроводниковой вертикальной двойной квантовой точки на основе арсенида галлия, имеющей низкие потенциальные барьеры. Выполнен анализ диаграммы зарядовой стабильности исследуемой точки в рамках модели постоянного взаимодействия, и в приближении одночастичного спектра Фока-Дарвина. Результаты анализа демонстрируют качественное совпадение наблюдаемых зависимостей с теоретическими предсказаниями
- На диаграмме зарядовой стабильности исследуемой двойной квантовой точки обнаружены области, в которых зарядовый транспорт определяется механизмами сотуннелирования. Эти области отчетливо наблюдаются в режиме кулоновской блокады. Кулоновская блокада таким образом снимается за счет процессов сотуннелирования, при условии выполнения для них закона сохранения энергии.
- В интервале внешних магнитных полей 6 – 12 Тесла на диаграмме зарядовой стабильности исследуемой квантовой точки наблюдаются линии, соответствующие расщеплению Зеемана основного и первого возбужденного орбитальных одноэлектронных состояний, при этом величина расщепления для этих состояний различна. Различие возникает вследствие наличия спин-орбитального взаимодействия. Константа спин-орбитального взаимодействия велика в гетероструктуре исследуемой

точки, в результате обусловленной низкими потенциальными барьерами большой протяженности волновых функций локализованных в квантовой точке электронов в области прилегающих слоев гетероструктуры.

- Предпринята попытка охлаждения полупроводниковой вертикальной квантовой точки до сверхнизких температур. Для наблюдения ожидаемой термической поляризации ядерных спинов арсенида галлия регистрировалось расщепление Зеемана основного одноэлектронного состояния. Наблюдалось отсутствие каких-либо существенных изменений при понижении температуры теплового резервуара. Сделан вывод, что стандартный дизайн экспериментальной ячейки не обеспечивает достаточного теплооттока из образца в резервуар.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Park, J. Coulomb blockade and Kondo effect in single-atom transistors / J. Park, A. N. Pasupathi, J. I. Goldsmith, C. Chang, Y. Yaish, J. R. Petta, M. Rinkoski, J. P. Sethna, H. D. Abruna, P. L. McEuen et al. // *Nature*. – 2002. – V. 417. – P. 722.
2. Petta, J. R. Studies of spin-orbit scattering in noble-metal nanoparticles using energy-level tunneling spectroscopy / J. R. Petta, D. C. Ralph // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – V. 87. – P. 266801.
3. Ralph, D. C. Spectroscopic measurements of discrete electronic states in single metal particles / D. C. Ralph, C. T. Black, M. Tinkham // *Phys. Rev. Lett.* – 1995. – V. 74. – P. 3241.
4. von Delft, J. Spectroscopy of discrete energy levels in ultrasmall metallic grains / J. von Delft, D. C. Ralph // 2001, *Phys. Rep.* – 2001. – V. 345. – P. 61-174.
5. Gueron, S. Tunneling via individual electron states in ferromagnetic nanoparticles / S. Gueron, M. M. Deshmukh, E. B. Myers, D. C. Ralph // *Phys. Rev. Lett.* – 1999. – V. 83. – P. 4148.
6. Klein, D. L. An approach to electrical studies of single nanocrystals / D. L. Klein, P. L. McEuen, J. E. B. Katari, R. Roth, A. P. Alivisatos // *Appl. Phys. Lett.* – 1996. – V. 68. – P. 2574.
7. Kouwenhoven, L. P. Mesoscopic electron transport / L. P. Kouwenhoven, C. M. Marcus, P. L. McEuen, S. Tarucha, R. M. Westervelt, N. S. Wingreen // *NATO Advanced Studies Institute, Series E: Applied Sciences*, edited by L. L. Sohn, L. P. Kouwenhoven, G. Schon. – 1997. – V. 345. – P. 16.
8. Kouwenhoven, L. P. Few-electron quantum dots / L. P. Kouwenhoven, D. G. Austing, S. Tarucha // *Rep. Prog. Phys.* – 2001. – V. 64. – P. 701-736.
9. Dekker, C. Carbon nanotubes as molecular quantum wires / C. Dekker // *Phys. Today*. – 1999. – V. 52, iss. 5. – P. 22.
10. McEuen, P. L. Single-wall carbon nanotubes / P. L. McEuen // *Phys. World*. – 2000. – V. 13, iss. 6. – P. 31.
11. Bjork, M. T. Few-electron quantum dots in nanowires / M. T. Bjork, C. Thelander, A. E. Hansen, L. E. Jensen, M. W. Larsson, L. R. Wallenberg, L.

Samuelson // *Nano Lett.* – 2004. – V. 4. – P. 1621-1625.

12. Shor, P. W. Algorithms for Quantum Computation: Discrete log and Factoring / P. W. Shor // *Proceedings of the 35th Annual Symposium on the Foundations of Computer Science*, edited by S. Goldwasser, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA. – 1994. – P. 124.

13. Loss, D. Quantum computation with quantum dots / D. Loss, D. P. DiVincenzo // *Phys. Rev. A.* – 1998. – V. 57. – P. 120.

14. Hanson, R. Spins in few electron quantum dots / R. Hanson, L. P. Kouwenhoven, J. R. Petta, S. Tarucha, L. M. K. Vandersypen // *Rev. Mod. Phys.* – 2007. – V. 79. – P. 1217.

15. Schliemann, J. Spin decay and quantum parallelism / J. Schliemann, A. V. Khaetskii, D. Loss // *Phys. Rev. B.* – 2002. – V. 66. – P. 245303.

16. Reilly, D. J. Suppressing Spin Qubit Dephasing by Nuclear State Preparation / D. J. Reilly, J. M. Taylor, J. R. Petta, C. M. Marcus, M. P. Hanson, A. C. Gossard // *Science*. 2008. – V. 321. – P. 817.

17. Bracker, A. S. Optical pumping of the electronic and nuclear spin of single charge-tunable quantum dots / A. S. Bracker, E. A. Stinaff, D. Gammon, M. E. Ware, J. G. Tischler, A. Shabaev, A. L. Efros, D. Park, D. Gershoni, V. L. Korenev, I. A. Merkulov // *Phys. Rev. Lett.* – 2005. – V. 94. – P. 047402.

18. Paget, D. Low field electron-nuclear spin coupling in gallium arsenide under optical pumping conditions / D. Paget, G. Lampel, B. Sapoval // *Phys. Rev. B.* – 1977. – V. 15. – P. 5780.

19. Ono, K. Current Rectification by Pauli Exclusion in a Weakly Coupled Double Quantum Dot System / K. Ono, D. G. Austing, Y. Tokura, S. Tarucha // *Science*. – 2002. – V. 297. – P. 1313.

20. Baugh, J. Large Nuclear Overhauser Fields Detected in Vertically Coupled Double Quantum Dots / J. Baugh, Y. Kitamura, K. Ono, S. Tarucha // *Phys. Rev. Lett.* – 2007. – V. 99. – P. 096804.

21. De Franceschi, S. Electron cotunneling in a semiconductor quantum dot / S. De Franceschi, S. Sasaki, J. M. Elzerman, W. G. van der Wiel, S. Tarucha, L. P. Kouwenhoven // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – V. 86. – P. 878.

22. Bychkov, Y. A. Properties of a 2D electron gas with lifted spectral degeneracy / Y. A. Bychkov, E. I. Rashba // *JETP Letters*. – 1960. – V. 39. – P. 78.

23. Maletinsky, P. Breakdown of the nuclear-spin-temperature approach in quantum-dot demagnetization experiments / P. Maletinsky, M. Kroner, A. Imamoglu // *Nature Physics*. – 2009. – V. 5. – P. 407.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК

1. Cotunneling effects in GaAs vertical double quantum dots / A. O. Badrutdinov, S. M. Huang, K. Kono, K. Ono, D. A. Tayurskii. // JETP Letters – 2011. – V.93, iss. 4. – P.217.
2. Транспортные свойства полупроводниковой вертикальной двойной квантовой точки с низкими потенциальными барьерами / А. О. Бадрутдинов, Ш. М. Хуанг, К. Коно, К. Оно, Д. А. Таюрский // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2010. – Т.152, кн. 4. – С. 7-20.

Публикации в других изданиях

3. Electron density distribution effects on spin dynamics in a quantum dot / Tayurskii D. A., Badrutdinov A. O., Kono K. // Тезисы докладов XXXV совещания по физике низких температур (НТ-35), Черногловка, 2009, с. 260.
4. Cotunneling effects in GaAs vertical double quantum dots / A. O. Badrutdinov, S. M. Huang, K. Kono, K. Ono, D. A. Tayurskii // Abstracts of International symposium on nanoscale transport and technology ISNTT-2011, Japan, NTT Atsugi, 11-14 January 2011, p. 182.
5. Non-extensive statistics for nanoscale systems – from quantum dots to quantum liquids / D. Tayurskii, A. Badrutdinov, N. Beysengulov, K. Kono, Yu. Lysogorskii // Abstracts of International conference “Frontiers in nanoscale science and technology” FNST-2011, Japan, RIKEN Wako, 5-7 January 2011, p. 44.