

На правах рукописи

**БРИЛИНСКАЯ ЕЛЕНА СТАНИСЛАВОВНА**

**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
НАНОСТРУКТУР, СИЛЬНОЛЕГИРОВАННЫХ БОРОМ**

01.04.07 - физика конденсированного состояния

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук  
**Баграев Николай Таймуразович**

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор  
**Агемян Вадим Фадеевич**

Доктор физико-математических наук  
**Шагинян Василий Робертович**

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ» им.  
В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)

Защита состоится « 15 » февраля 2012 г. в 16 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.29 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, II уч. корп., ауд.265.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « 29 » декабря 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.ф.-м.н.

Ермакова Н.Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Возможности квантования энергии носителей тока в поперечном магнитном поле были строго обоснованы Л.Д. Ландау [1], который показал, что в этом случае непрерывный энергетический спектр свободных электронов трансформируется в систему подзон,  $E_v = \hbar\omega_c (v+1/2)$ , где  $\omega_c = eB/m^*$ ,  $m^*$  - эффективная масса,  $v$  - номер уровня Ландау. Эти условия квантования практически немедленно получили экспериментальное подтверждение вследствие обнаружения двух фундаментальных эффектов при исследовании поведения продольного сопротивления (эффект Шубникова – де Гааза (ШДГ) [2]) и магнитной восприимчивости (эффект де Гааза – ван Альфена (дГВА) [3]) висмута в поперечном магнитном поле.

В обоих случаях были зарегистрированы осцилляции транспортных характеристик в зависимости от величины внешнего магнитного поля, период которых соответствовал энергетическому зазору между уровнями Ландау,  $\hbar\omega_c$ . Причем максимумы осцилляций сопротивления и магнитной восприимчивости наблюдались каждый раз, когда при изменении магнитного поля совпадали значения энергии очередного уровня Ландау и уровня Ферми,  $E_F$ , позиция которого соответствует максимальной энергии свободных носителей тока в образце. Соответственно, минимумы осцилляций сопротивления и магнитной восприимчивости регистрировались в условиях, когда уровень Ферми фиксировался между двумя соседними уровнями Ландау.

В дальнейшем, эффекты Шубникова - де Гааза и де Гааза – ван Альфена развились в классические методы в физике конденсированного состояния. Особенно интерес к исследованиям осцилляций Шубникова - де Гааза возрос после развития технологий получения низкоразмерных полупроводниковых структур с высокой подвижностью носителей тока [4]. В этом случае энергетические позиции уровней размерного квантования определяют спектр уровней Ландау, который отражается в квантовании характеристик продольного транспорта двумерных носителей тока. Следует отметить, что осцилляции Шубникова - де Гааза являются важной составляющей исследования квантового эффекта Холла, поскольку позиции их максимумов сверхточно согласуются с серединами ступенек квантовой лестницы холловского сопротивления [5]. В свою очередь, эффект де Гааза – ван Альфена стал мощным инструментом исследований поверхности Ферми, поскольку период осцилляций магнитного момента, рассматриваемый как функция  $1/H$ , непосредственно взаимосвязан с площадью ее максимального или минимального поперечного сечения

плоскостью, перпендикулярной магнитному полю [6]. Особенно интенсивно исследования по идентификации поверхности Ферми различных металлов, полупроводников и сверхпроводников стали проводиться после создания фундаментальной теории Лифшица - Косевича, в рамках которой было получено соотношение, связывающее осциллирующий магнитный момент с экстремальным сечением поверхности Ферми [7]. Кроме того, полученная теоретическая зависимость амплитуд ШдГ и дГВА осцилляций от температуры позволила использовать их измерения для определения эффективной массы носителей тока, что представляет практический интерес, в частности, для физики низкоразмерных структур [8].

Однако в течение долгого времени не удавалось наблюдать осцилляции ШдГ и дГВА при температуре  $T > 30$  К из-за жесткости условия «сильного поля»,  $\omega_c \tau = \mu \cdot B \gg 1$ , которое соответствует высокой подвижности,  $\mu = (e \cdot \tau) / m^*$ , носителей тока и выполняется при наличии низкого значения эффективной массы,  $m^*$ , и большого времени релаксации момента,  $\tau$  [9]. Кроме того, регистрации осцилляций ШдГ и дГВА препятствует тепловое размытие в случае невыполнения условия  $\hbar \omega_c > kT$ . Тем не менее, осцилляции ШдГ были обнаружены при комнатной температуре в графене благодаря низкой эффективной массе носителей,  $\sim 10^{-4} m_0$ , хотя для их регистрации понадобилось использовать магнитное поле величиной 29 Т вследствие короткого времени релаксации момента [10]. Таким образом, реализация условия сильного поля в слабых магнитных полях оставалась практически нерешенной задачей.

Еще более жесткие ограничения существуют для наблюдения осцилляций дГВА в сверхпроводниках, поскольку величина магнитного поля, необходимого для их регистрации, обычно превосходит критическое поле,  $H_{c2}$ , фазового перехода из сверхпроводящего в нормальное состояние. Поэтому в классических сверхпроводниках осцилляции дГВА могут проявиться в области очень низких температур,  $T < (eH_{c2} / 2\pi^2 m^* c) \sim T_c^2 / E_F$ , где  $T_c$  – критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние [11, 12]. Данное ограничение в значительной степени смягчается в связи с развитием технологии высокотемпературных сверхпроводников, для которых измерения осцилляций дГВА становятся одним из основных методов идентификации механизма сверхпроводимости [13, 14]. Причем особый интерес вызывают модельные представления высокотемпературных сверхпроводников в рамках последовательности джозефсоновских переходов, представляющих собой систему сверхпроводящих  $\delta$  - барьеров, разделенных квантово-размерными диэлектрическими или металлическими прослойками.

Именно в подобных джозефсоновских наносандвичах было реализовано приближение сильного поля при высоких температурах в слабых магнитных полях [15, 16, 17, 18]. Эти наносандвичи, полученные на поверхности кристалла фторида кадмия  $n$  – типа проводимости, представляли собой сверхузкую, 2 нм, квантовую яму  $\text{CdF}_2$   $p$  – типа, ограниченную  $\delta$ -барьерами, проявляющими сверхпроводящие свойства, вследствие которых двумерные дырки обладают малой эффективной массой и большим временем релаксации момента, что позволило зарегистрировать осцилляции ШдГ при комнатной температуре [16]. Поэтому особый интерес к таким наноструктурам обусловлен возможностями изучения взаимосвязанности сверхпроводящих свойств  $\delta$ -барьеров и квантования энергии носителей в ограничиваемых ими квантовых ямах, проволоках и точках, если сверхпроводящая длина когерентности и фермиевская длина волны отличаются незначительно [15, 18, 19]. Данная взаимосвязанность может быть обнаружена в исследованиях как поперечного, так и продольного транспорта. В частности, при туннелировании через наносандвич, который представляет собой двойной барьер, наблюдается синхронное поведение спектральных зависимостей сверхтока и проводимости двумерных дырок, регистрируемых соответственно ниже и выше температуры сверхпроводящего перехода  $\delta$ -барьеров [16, 19]. В этом случае пиковые значения сверхтока,  $I_c$ , и проводимости,  $G_n$ , совпадают с энергетическими позициями уровней размерного квантования, а их соотношение отражает взаимосвязанность процессов туннелирования одиночных дырок и их пар,  $I_c/G_n = \pi\Delta/e$  [15, 17, 20]. В свою очередь, в исследованиях квантования характеристик продольного транспорта в наносандвиче следует ожидать проявления взаимосвязанности сверхпроводящих свойств  $\delta$ -барьеров и квантования Ландау вследствие наличия дискретных состояний Бозе-конденсата, которые подвержены влиянию внешнего магнитного поля и температуры, что может привести к изменению величины плотности и эффективной массы двумерных носителей.

Вышесказанное определяет актуальность темы настоящей работы, основным направлением которой было обнаружение осцилляций де Гааза – ван Альфена и их детальное исследование для идентификации характеристик отмеченных выше наносандвичей на основе кремния и фторида кадмия.

Цель работы заключалась в обнаружении и исследовании квантования магнитного момента в полупроводниковых наноструктурах, сильнолегированных бором, при высоких температурах в слабых магнитных полях.

**В задачи работы** входило изучение следующих вопросов:

1. Регистрация полевых и температурных зависимостей статической магнитной восприимчивости сверхузких квантовых ям  $p$ -типа, ограниченных  $\delta$  - барьерами, сильнолегированными бором, на поверхности кристаллов фторида кадмия и кремния (100)  $n$ -типа.
2. Экспериментальная реализация условия «сильного поля»,  $\omega_c \tau = \mu \cdot B \gg 1$ , где  $\tau$  и  $\mu$  – транспортное время и подвижность носителей, для обнаружения осцилляций де Гааза – ван Альфена при высоких температурах в слабых магнитных полях.
3. Исследование температурных зависимостей характеристик осцилляций де Гааза – ван Альфена для определения значений плотности и эффективной массы двумерных дырок в сверхузких квантовых ямах  $p$ -типа, ограниченных  $\delta$  - барьерами, сильнолегированными бором, на поверхности кристаллов фторида кадмия и кремния (100)  $n$ -типа.
4. Исследование температурных изменений плотности и эффективной массы двумерных дырок с помощью измерений температурных зависимостей амплитуды осцилляций де Гааза – ван Альфена для изучения формирования квантовых состояний Бозе-конденсата вследствие сверхпроводящих свойств сильнолегированных бором  $\delta$  - барьеров, ограничивающих квантовые ямы  $p$ -типа проводимости на поверхности кремния (100) и фторида кадмия  $n$ -типа.
5. Обнаружение и исследование осцилляций типа Ааронова-Бома, возникающих в полевых зависимостях статической магнитной восприимчивости вследствие фрактальной самоорганизации микродефектов на поверхности  $\delta$  - барьеров, сильнолегированных бором.

**Научная новизна работы**

1. Измерения полевых и температурных зависимостей статической магнитной восприимчивости сверхузких квантовых ям  $p$ -типа, ограниченных  $\delta$  - барьерами, сильнолегированными бором, на поверхности кристаллов фторида кадмия и кремния (100)  $n$ -типа позволили обнаружить осцилляции де Гааза – ван Альфена (дГВА) при высоких температурах в слабых магнитных полях.
2. Измерения температурных зависимостей амплитуд осцилляций дГВА в наносандвичах кремния и фторида кадмия позволили определить малую величину эффективной массы двумерных дырок благодаря которой квантование энергии и магнитного момента стала возможной при высоких температурах.

3. Обнаружено периодическое изменение частоты осцилляций дГВА, сопровождаемое диамагнитным откликом, с ростом температуры, которое позволило идентифицировать синхронные температурные осцилляции плотности и эффективной массы двумерных дырок в сверхузких квантовых ямах кремния и фторида кадмия вследствие формирования Бозе-конденсата в ограничивающих их  $\delta$  - барьерах, сильнолегированных бором.
4. Обнаружены осцилляции типа Ааронова-Бома, возникающие в полевых зависимостях статической магнитной восприимчивости вследствие фрактальной самоорганизации микродефектов на поверхности сильнолегированных бором  $\delta$  - барьеров, ограничивающих квантовые ямы кремния и фторида кадмия.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается сравнительным анализом экспериментальных данных, полученных с помощью различных методик, а также их соответствием с имеющимися на сегодняшний день экспериментальными и теоретическими результатами изучения квантования магнитного момента в низкоразмерных полупроводниковых структурах.

**Научная и практическая значимость** диссертационного исследования определяется обнаружением осцилляций де Гааза – ван Альфена (дГВА) при высоких температурах в слабых магнитных полях в планарных наносандвичах кремния и фторида кадмия; обнаружением синхронных температурных осцилляций плотности и эффективной массы двумерных дырок вследствие сверхпроводящих свойств сильнолегированных бором  $\delta$  - барьеров, ограничивающих сверхузкие квантовые ямы кремния и фторида кадмия  $p$ -типа; обнаружением периодических осцилляций статической магнитной восприимчивости, обусловленных фрактальной самоорганизацией микродефектов на поверхности низкоразмерных и объемных пара- и диамагнетиков; измерениями малой величины эффективной массы двумерных дырок с помощью регистрации температурных зависимостей осцилляций дГВА.

#### **Защищаемые положения**

1. Полевые зависимости статической магнитной восприимчивости сверхузких квантовых ям  $p$ -типа, ограниченных  $\delta$  - барьерами, сильнолегированными бором, на поверхности кристаллов фторида кадмия и кремния (100)  $n$ -типа проявляют осцилляции де Гааза – ван Альфена при высоких температурах в слабых магнитных полях.
2. Квантование магнитного момента при высоких температурах в условиях продольного транспорта двумерных дырок обеспечивается благодаря их малой эффективной массе, определенной из

температурных зависимостей амплитуд осцилляций де Гааза – ван Альфена в сверхузких квантовых ямах  $p$ -типа, ограниченных  $\delta$  - барьерами, сильнолегированными бором, на поверхности кристаллов фторида кадмия и кремния (100)  $n$ -типа.

3. Плотность и эффективная масса одиночных двумерных дырок в сверхузких квантовых ямах  $p$ -типа синхронно осциллируют с ростом температуры в условиях формирования квантовых состояний Бозе-конденсата вследствие сверхпроводящих свойств  $\delta$  - барьеров, сильнолегированных бором.
4. Периодические осцилляции типа Ааронова – Бома возникают в полевых зависимостях статической магнитной восприимчивости только при определенных значениях дискретного изменения магнитного поля, которые взаимосвязаны с параметрами фрактальной самоорганизации микродефектов на поверхности низкоразмерных и объемных пара- и диамагнитных структур.

**Апробация результатов работы.** Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международной конференции по наносистемам, NANO-2010 (Рим, Италия, 2010); 6-й Международной конференции по квантовым вихрям в наноструктурированных сверхпроводниках, VORTEX-6 (Родос, Греция, 2009); 11-й Международной конференции PLMCN-11 (Берлин, ФРГ, 2011); 8-й Международной конференции «Кремний-2001» (Москва, Россия, 2011); 10-й Российской конференции по физике полупроводников (Нижний Новгород, Россия, 2011).

**Публикации:** по результатам исследований, изложенных в диссертации, имеется 5 публикаций в ведущих отечественных и международных журналах. Список публикаций приведен в конце диссертации.

**Структура диссертации:** Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения.

**Первая глава** представляет собой обзор литературы, посвященный исследованиям эффектов квантования энергии и магнитного момента в условиях продольного транспорта носителей в поперечном магнитном поле. Основное внимание обращено на важнейшую роль экспериментов Шубникова – де Гааза и де Гааза – ван Альфена, которые впервые зарегистрировали осциллирующие зависимости сопротивления и намагниченности монокристаллов висмута от величины внешнего магнитного поля, в решение фундаментальных проблем в физике конденсированного состояния. Подчеркивается, что эффект Шубникова –



де Гааза (ШдГ) [2] оказался первым экспериментально наблюдаемым проявлением диамагнитного квантования энергии электронов в твердом теле и, как следствие этого, – осциллирующей зависимости электронной плотности состояний на уровне Ферми от напряженности магнитного поля. Позднее были обнаружены осцилляции магнитного момента (эффект де Газа – ван Альфена (дГвА) [3]), термоэдс, холловской ЭДС, теплоемкости, теплопроводности, квазиклассического коэффициента поглощения длинноволнового звука и других термодинамических и кинетических характеристик металла, которые в настоящее время объединены общим названием квантовых осцилляционных эффектов. Сравнительная легкость наблюдения в сочетании с высокой информативностью о параметрах электронной системы привели к тому, что эффекты ШдГ и дГвА получили широкое применение и стали одними из основных методов исследования энергетического спектра электронов в металлах, полуметаллах и полупроводниках.

В первом параграфе рассматриваются условия для наблюдения эффектов, обусловленных квантованием Ландау [1], который показал, что сплошной энергетический спектр свободных носителей становится квантованным в условиях внешнего магнитного поля перпендикулярного их движению. В этом случае решение соответствующего уравнения Шредингера уравнения приводит к заключению, что энергия электрона может быть представлена в виде суммы энергии поступательного движения вдоль магнитного поля и квантованной энергии циклотронного движения в плоскости, перпендикулярной магнитному полю:  $E_v = \hbar\omega_c (v+1/2) + \hbar^2 k_z^2 / 2m$ . Таким образом, в отсутствие магнитного поля энергетический спектр свободных носителей, отвечающий его движению в плоскости  $(x, y)$ , является квазинепрерывным, но при включении магнитного поля он разбивается на отдельные узкие полоски, каждая из которых, ”сжимаясь”, превращается в дискретный уровень Ландау со степенью вырождения  $2\mu_B H$ .

Фактически это было предсказанием того, что при низких температурах намагниченность и сопротивление кристаллов должны осциллировать при изменении магнитного поля, когда уровни Ландау, энергетический зазор между которыми равен  $\hbar\omega_c$ , ”проходят” уровень Ферми и оказываются незаселенными, тем самым, демонстрируя размерное квантование в магнитном поле.

Во втором параграфе детально рассматриваются условия наблюдения осцилляций ШдГ и дГвА, которые являются достаточно жесткими и сводятся к так называемому критерию «сильного поля»,  $\mu B \gg 1$ , где  $\mu$  – подвижность носителей, которое определяет отсутствие

рассеяния носителей при выполнении более, чем одного оборота в магнитном поле:  $\omega_c \tau \gg 1$ , а также – размытия расстояния между соседними уровнями Ландау за счет появления “хвоста” максвелловского распределения при  $T > 0$  К:  $\hbar\omega_c > kT$ ;  $E_F > \hbar\omega_c$ . Именно поэтому в течение долгих лет эффекты ШдГ и дГВА наблюдались в объемных системах только в сильных магнитных полях при низких температурах вследствие отсутствия структур с высокой подвижностью носителей. Тем не менее, они открыли новые направления для регистрации явлений квантовой интерференции, количественное описание которых стало возможным благодаря теоретическим работам И. Лифшица и А. Косевича, построивших наиболее строгую теорию осцилляционных эффектов в металлах [21]. Далее представлены основные соотношения, полученные в рамках данной теории, с анализом их применимости для результатов исследований осцилляций дГВА в металлах, полуметаллах и полупроводниках.

Третий параграф посвящен рассмотрению возможностей изучения осцилляций ШдГ и дГВА в низкоразмерных структурах. Отмечается, что заметное усиление интереса к эффекту де Гааза – ван Альфена в последние годы обусловлено интенсивными исследованиями полупроводниковых наноструктур, в которых спектр уровней Ландау определяется, в первую очередь, позициями уровней размерного квантования. Рассматривается теоретическая температурная зависимость амплитуды осцилляций дГВА, полученная в рамках основных соотношений И. Лифшица и А. Косевича, с помощью которой возможно определить значение эффективной массы носителей в полупроводниковых квантовых ямах. Далее обсуждаются различные версии смягчения критерия «сильного поля»,  $\mu B \gg 1$ , для экспериментального наблюдения осцилляций ШдГ и дГВА в низкоразмерных структурах. В качестве примера приводится обнаружение осцилляций ШдГ при комнатной температуре в графене благодаря низкой эффективной массе носителей,  $\sim 10^{-4} m_0$ . Однако для их регистрации понадобилось использовать магнитное поле величиной 29Т вследствие короткого времени релаксации момента [22]. Таким образом, делается вывод, что реализация условия «сильного поля» в слабых магнитных полях в течение долгого времени оставалась практически нерешенной задачей. Поэтому в заключительной части третьего параграфа основное внимание концентрируется на возможностях смягчения критерия «сильного поля» в наносандвичах, которые представляют собой полупроводниковые квантовые ямы, ограниченные сверхпроводящими  $\delta$  – барьерами. Несмотря на достаточно жесткое условие для наблюдения осцилляций дГВА в классических сверхпроводниках:  $T < (eH_c/2\pi^2 m^* c) \sim T_c^2/E_F$ , где  $T_c$

– критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние [11, 12], их регистрация стала возможной в структурах на основе высокотемпературных сверхпроводников [13, 14]. Отмечено, что осцилляции ШДГ наблюдались при высоких температурах в слабых магнитных полях в джозефсоновских наносандвичах на основе фторида кадмия [15, 16, 17]. Эти наносандвичи, полученные на поверхности кристаллов кремния и фторида кадмия  $n$  – типа проводимости, представляли собой сверхузкую, 2 нм, квантовую яму  $p$  – типа, ограниченную  $\delta$ -барьерами, проявляющими сверхпроводящие свойства, вследствие которых двумерные дырки обладают малой эффективной массой и большим временем релаксации момента. На основании изложенного выше делается вывод, что регистрация осцилляций дГВА при различной температуре в наносандвичах на основе кремния и фторида кадмия представляет значительный интерес, поскольку следует ожидать проявления взаимосвязанности сверхпроводящих свойств  $\delta$ -барьеров и квантования Ландау вследствие наличия дискретных состояний Бозе-конденсата [22]. В заключительной части третьего параграфа рассматриваются возможности полевых зависимостей статической магнитной восприимчивости для регистрации осцилляций Ааронова – Бома (АБ), период которых определяется магнитным потоком,  $\Phi = n \Phi_0$ , где  $\Phi_0 = h/2e$  и  $\Phi_0 = h/e$  соответственно при наличии сверхпроводимости и баллистического транспорта носителей, в отличие от осцилляций дГВА, периодических в зависимости от обратного магнитного поля,  $1/H$ , период осцилляций АБ. Поэтому дГВА и АБ осцилляции могут быть независимо идентифицированы при измерении полевых зависимостей магнитной восприимчивости, что представляет интерес для исследований низкоразмерных структур с искусственно упорядоченной системой квантовых точек, а также – фрактальной самоорганизации поверхности объемных твердых тел.

В конце главы формулируются цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе рассматриваются вопросы получения и исследования свойств полупроводниковых кристаллов фторида кадмия  $n$ -типа, а также – возможностей реализации на их поверхности квантово-размерных  $p^+-n$  – переходов.

В первом параграфе обсуждаются свойства фторида кадмия, как одного из немногих широкозонных полупроводников с ионным характером связи. Отмечается, что фторид кадмия – это единственный кристалл, обладающий фундаментальным свойством примесного полупроводника – наличием водородоподобных донорных орбиталей,

характеристики которых слабо зависят от химической природы легирующей примеси. Поэтому полупроводниковые свойства ионного кристалла  $\text{CdF}_2$  с шириной запрещенной зоны 7.8 эВ, в полтора раза большей, чем у самого широкозонного из традиционных полупроводников – алмаза, 5.5 эВ, вызвали большой интерес исследователей, который долгое время сдерживался невозможностью реализации  $p$ - $n$  перехода из-за монополярной,  $n$ -типа, проводимости фторида кадмия. Однако недавно удалось получить на поверхности кристалла  $n$ - $\text{CdF}_2$  путем диффузии бора сверхмелкие  $p^+$ - $n$  – переходы, что открывает большие возможности для их практического применения [23].

Второй параграф посвящен методам получения полупроводниковых кристаллов  $\text{CdF}_2$ . Рассматриваются вопросы их роста. При этом основное внимание уделяется анализу методов и технологии их аддитивного окрашивания, в результате которых кристалл приобретает проводимость только  $n$ -типа.

В третьем параграфе подробно рассматриваются вопросы легирования фторида кадмия. Анализируется электронная структура бистабильных центров, которые формируются на основе мелких доноров. Обсуждаются свойства бистабильных центров как DX-центров, которые возникают вследствие отрицательной корреляционной энергии, в большой степени определяющей электрические и оптические свойства легированных кристаллов фторида кадмия.

В четвертом параграфе обсуждаются методы получения сверхмелкие  $p^+$ - $n$  – переходов с помощью диффузии бора из газовой фазы, а также – их идентификация на поверхности кристаллов  $\text{CdF}_2$   $n$ -типа. Показано, что прямые ветви ВАХ  $p^+$ - $n$ -переходов проявляют запрещенную зону, 7.8 эВ, а также позволяют идентифицировать строение валентной зоны кристаллов фторида кадмия. При этом ВАХ высокого разрешения находится в хорошем согласии с данными, полученными с помощью методов оптической и фотоэлектронной спектроскопии [24].

В пятом параграфе приведены результаты исследований проводимости баллистических дырочных каналов, проникающих из области  $p^+$ - $n$ -перехода в объем кристалла  $n$ - $\text{CdF}_2$ . Кроме того, реализация баллистического режима проводимости была идентифицирована в плоскости квазидвумерного газа дырок на поверхности кристалла  $n$ - $\text{CdF}_2$  путем регистрации квантовой лестницы проводимости с помощью изменения напряжения на расщепленном затворе.

**Третья глава** посвящена анализу характеристик сверхмелких  $p^+$ - $n$  переходов на поверхности кристаллов  $n$ - $\text{CdF}_2$  и  $n$ - $\text{Si}(100)$ .

В первом параграфе приведены результаты исследований токовых ВАХ и ВАХ проводимости высокого разрешения сверхузкой квантовой ямы  $p$ -типа проводимости, ограниченной  $\delta$ -барьерами, сильнолегированными бором, которая формируется внутри  $p^+$ -области  $p^+$ - $n$  перехода на поверхности кристалла  $n$ - $\text{CdF}_2$ . Эти данные не только позволили определить энергетические позиции подзон двумерных дырок, но и в совокупности с результатами исследований температурных и полевых зависимостей сопротивления, статической магнитной восприимчивости и теплоемкости сделали возможной идентификацию сверхпроводящих свойств наносандвичей  $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}/p\text{-CdF}_2\text{-QW}/\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$  [15, 16].

Во втором параграфе анализируются сверхпроводящие свойства наноструктурированных  $\delta$ -барьеров  $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$ , ограничивающих квантовую яму  $\text{CdF}_2$   $p$ -типа проводимости. Исследования магнитных, электрических и оптических характеристик наносандвичей показало, что  $\delta$ -барьеры, сильнолегированные бором, состоят из последовательностей чередующихся нелегированных и легированных квантовых точек. Причем последние содержат одиночные тригональные дипольные центры бора,  $B^+$ - $B^-$ , с отрицательной корреляционной энергией, которые сформированы вследствие реконструкции мелких акцепторов бора,  $2B^0 \Rightarrow B^+ + B^-$  [15].

Третий параграф представляет собой краткий обзор сверхпроводящих свойств планарных кремниевых наносандвичей,  $\text{Si(B)}/p\text{-Si}/\text{Si(B)}$  [19, 25]. Показано, что экстремально малое значение эффективной массы двумерных дырок, обнаруженное в кремниевых наносандвичах, не только является главным аргументом в пользу биполярного механизма высокотемпературной сверхпроводимости сильнолегированных бором  $\delta$ -барьеров, но и позволяет исследовать квантование магнитного момента при высоких температурах в слабых магнитных полях.

**В четвертой главе** представлены результаты по обнаружению и исследованию эффекта де Гааза – ван Альфена (дГВА) в наносандвичах  $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}/p\text{-CdF}_2\text{-QW}/\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$  и  $\text{Si(B)}/p\text{-Si}/\text{Si(B)}$  при высоких температурах в слабых магнитных полях.

В первом параграфе приведены результаты измерений полевых и температурных зависимостей статической магнитной восприимчивости наносандвичей  $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}/p\text{-CdF}_2\text{-QW}/\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$ , которые выявили особенности регистрации осцилляций дГВА в интервале температур вблизи критической температуры перехода  $\delta$ -барьеров  $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$  из нормального в сверхпроводящее состояние. Исследования проводились в диапазоне напряженностей магнитных полей 0 – 1.1 Тл в интервале температур от 280К до 350К методами Фарадея и Гуи на установке MGD

312 FG в автоматизированном режиме. Калибровка установки осуществлялась с помощью эталонного образца фосфида индия с восприимчивостью  $\chi = -313 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{г}$ . Причем высокая чувствительность,  $10^{-9} - 10^{-10} \text{ CGS}$ , балансного спектрометра MGD 312 FG обеспечивала ее высокую стабильность.

Показано, что квантование энергии и магнитного момента в условиях продольного транспорта носителей стали возможными вследствие достижения приближения «сильного поля»,  $\omega_c \cdot \tau = \mu \cdot B \gg 1$ , благодаря малой эффективной массе двумерных дырок, величина которой определялась с помощью измерений температурных зависимостей амплитуд осцилляций дГВА. Температурные зависимости плотности двумерных дырок, определенной из значений периода осцилляций дГВА от обратного поля, показывают, что она изменяется в противофазе с их амплитудой. Иными словами, увеличение плотности двумерных дырок в квантовой яме наносандвича сопровождается диамагнитным откликом ограничивающих ее  $\delta$  - барьеров. Эти исследования показали, что плотность и эффективная масса одиночных двумерных дырок синхронно осциллируют при изменении температуры в интервале  $280\text{K} \div 350\text{K}$ , соответственно в пределах  $0.4 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2} \div 1.2 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$  и  $3 \cdot 10^{-5} m_0 \div 5 \cdot 10^{-5} m_0$ , где  $m_0$  – масса электрона. Следует отметить, что величина эффективной массы дырок, определенная с помощью соотношений Лифшица–Косевича [21], находится в хорошем согласии с данными исследований осцилляций Ааронова–Кашера в краевых каналах наносандвичей  $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}/p\text{-CdF}_2\text{-QW}/\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$  [17]. Резкое уменьшение эффективной массы двумерных дырок и ее осцилляции рассматриваются как результат формирования дипольных центров бора с отрицательной корреляционной энергией, которые составляют основу  $\delta$  - барьеров, сильнолегированных бором. Далее, приведен анализ поведения наблюдаемых осцилляций плотности и эффективной массы двумерных дырок в рамках формирования квантовых состояний Бозе-конденсата [22], которое является следствием дискретного изменения длины когерентности куперовских пар дырок в условиях фрактальной структуры сверхпроводящих  $\delta$  - барьеров, сильнолегированных бором.

Второй параграф посвящен сравнению результатов измерений осцилляций ШДГ и дГВА в наносандвичах  $\text{Si(B)}/p\text{-Si}/\text{Si(B)}$ . Обнаруженное изменение периода осцилляций дГВА при  $T=120\text{K}$  согласуется с оценкой температуры их наблюдения с учетом выполнения условия «сильного поля», принимая во внимание характеристики кремниевых наносандвичей, и, возможно, связано с процессами квантования длины когерентности куперовских пар дырок в  $\delta$ -барьерах.

**Пятая глава** посвящена обнаружению и исследованию полевых и температурных зависимостей магнитной восприимчивости фрактальных систем макроскопических и микроскопических микродефектов, возникающих на поверхности твердых тел вследствие самоорганизации. Обнаружено, что в этом случае персистентные диамагнитные токи, формируемых в замкнутых траекториях вокруг микродефектов, могут приводить к осцилляциям магнитного момента типа Ааронова-Бома (АБ).

В первом параграфе анализируются результаты исследований поверхности кремниевых наносандвичей с помощью сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Эти исследования позволили идентифицировать фрактальное самоупорядочение чередующихся сверхпроводящих и несверхпроводящих макроскопических микродефектов в наноструктурированных  $\delta$ -барьерах, сильнолегированных бором.

Во втором параграфе приведены результаты исследований полевых зависимостей статической магнитной восприимчивости низкоразмерных диамагнетиков, таких как наносандвичи на основе кремния и фторида кадмия, а также объемных парамагнетиков и ферромагнетиков, которые проявляют периодические осцилляции типа Ааронова-Бома (АБ) на фоне осцилляций де Гааза – ван Альфена. Поведение обнаруженных АБ осцилляций с периодом 25 мТ представляется крайне необычным и ранее не наблюдавшимся, поскольку они регистрируются только при определенных значениях дискретного изменения магнитного поля, которые взаимосвязаны с параметрами фрактальной самоорганизации микродефектов на поверхности низкоразмерных и объемных структур. Кроме того, пики этих осцилляций расщеплены в области магнитного поля ниже 220 мТ. Причем величина расщепления равна 10 мТ. Полученные результаты показывают, что свойства замкнутых контуров вокруг макроскопических микродефектов, участвующих в формировании АБ осцилляций, зависят от дискретности изменения магнитного поля. Причем при определенных значениях дискретного изменения магнитного поля не наблюдается, как могло ожидать, фазового сдвига АБ осцилляций, а происходит полное тушение ответственных за их возникновение персистентных диамагнитных токов. Поэтому экспериментальные данные по квантованию магнитного момента в системе самоупорядоченных микродефектов рассматривались в работе в рамках квантовой интерференции внутри фрактальных систем макроскопических и микроскопических неидеальных колец [26].

В **Заключении** приводятся основные результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Осцилляции де Гааза – ван Альфена (дГВА) были обнаружены при высоких температурах в слабых магнитных полях с помощью измерений полевых и температурных зависимостей статической магнитной восприимчивости сверхузких квантовых ям  $p$ -типа, ограниченных  $\delta$  - барьерами, сильнолегированными бором, на поверхности кристаллов фторида кадмия и кремния (100)  $n$ -типа.
2. Регистрация квантования магнитного момента в условиях продольного транспорта носителей стала возможной вследствие достижения приближения «сильного поля»,  $\omega_c \tau = \mu \cdot B \gg 1$ , благодаря малой эффективной массе двумерных дырок, что подтверждается измерениями температурных зависимостей амплитуд осцилляций дГВА.
3. Обнаружено периодическое изменение частоты осцилляций дГВА, сопровождаемое диамагнитным откликом, с ростом температуры, которое позволило идентифицировать температурные осцилляции плотности двумерных дырок в сверхузких квантовых ямах  $p$ -типа, ограниченных  $\delta$  - барьерами, сильнолегированными бором, на поверхности кристаллов  $\text{CdF}_2$  и  $\text{Si}$  (100)  $n$ -типа.
4. Показано, что плотность и эффективная масса одиночных двумерных дырок синхронно осциллируют с ростом температуры. Полученные результаты объясняются в рамках формирования квантовых состояний Бозе-конденсата, которое является следствием дискретного изменения длины когерентности куперовских пар дырок в условиях фрактальной структуры сверхпроводящих  $\delta$  - барьеров, сильнолегированных бором.
5. Исследования полевых зависимостей статической магнитной восприимчивости низкоразмерных и объемных парамагнетиков, диамагнетиков и ферромагнетиков позволили обнаружить периодические осцилляции типа Ааронова-Бома (АБ).
6. Обнаруженные АБ осцилляции регистрируются только при определенных значениях дискретного изменения магнитного поля, которые взаимосвязаны с параметрами фрактальной самоорганизации микродефектов на поверхности низкоразмерных и объемных структур.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л.Д. Диамагнетизм металлов [Текст] / Л.Д. Ландау // Zs. Phys. – 1930. - Т.64. - С.629.
2. Schubnikow L. Magnetische Widerstandsvergrosserung in Einkristallen von Wismut bei tiefen Temperaturen [Text] / L. Schubnikow, W.J. de Haas// Leiden Commun.- 1930. - V.207a. - P.3.
3. de Haas W.J. Note on the dependence of the susceptibility of diamagnetic metals on the field [Text] / W.J. de Haas, P.M. van Alphen //Leiden Commun. - 1931. - V.208d. - P.31.
4. Fowler A.B. Magneto-Oscillatory Conductance in Silicon Surfaces [Text]/ A.B. Fowler, F.F. Fang, W.E. Howard, P.J. Stiles // Phys. Rev. Lett. - 1966. - V.16. - P.901.
5. von Klitzing K. New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance [Text] / K. von Klitzing, G. Dorda, M. Pepper // Phys. Rev. Lett. - 1980. - V.45. - P.494.
6. Shoenberg D. The de Haas - van Alphen Effect [Text] / D. Shoenberg// Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. – 1952. - V.245. - P.1.
7. Лифшиц И.М. К теории магнитной восприимчивости металлов при низких температурах [Текст] / И.М. Лифшиц, А.М. Косевич // ЖЭТФ. - 1955. - Т.29. - С.730.
8. Pudalov V.M. Low-Density Spin Susceptibility and Effective Mass of Mobile Electrons in Si Inversion Layers [Text]/ V.M. Pudalov, M.E. Gershenson, H. Kojima, N. Butch, E.M. Dizhur, G. Brunthaler, A. Prinz, G. Bauer // Phys. Rev. Lett. - 2002. - V.88. - P.196404.
9. Landwehr G. Quantum transport in n-type and p-type modulation-doped mercury telluride quantum wells [Text] / G. Landwehr, J. Gerschütz, S. Oehling, A. Pfeuffer-Jeschke, V. Latussek, C.R. Becker // Physica E. - 2000. - V.6. - P.713.
10. Geim A.K. The rise of grapheme [Text] / A.K. Geim, K. S. Novoselov // Nature Materials. - 2007. - V.6. - P.183.
11. Минеев В.П. Эффект де Гааза — ван Альфена в сверхпроводниках [Текст] / В.П. Минеев, М.Г. Вавилов// УФН. - 1997. - Т.167. - С.1121.
12. Бычков Ю.А. Влияние примесей на эффект де Гааза — ван Альфена [Текст] / Ю.А. Бычков // ЖЭТФ. – 1960. - Т.39. - С.1401.
13. Thompson L. de Haas–van Alphen oscillations in high-temperature superconductors [Text]/ L. Thompson, P.C.E. Stamp// Phys. Rev. B. - 2010. - V.81. - P.100514(R).
14. Audouard A. Multiple Quantum Oscillations in the de Haas–van Alphen Spectra of the Underdoped High-Temperature Superconductor

- $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$  [Text]/ A. Audouard, C. Jaudet, D. Vignolles, R. Liang, D.A. Bonn, W.N. Hardy, L. Taillefer, C. Proust // *Phys. Rev. Lett.* - 2009. - V.103. - P.157003.
15. Баграев Н.Т. Спиновый транзистор на основе наноструктур фторида кадмия [Текст] / Н.Т. Баграев, О.Н. Гимбицкая, Л.Е. Клячкин, А.А. Кудрявцев, А.М. Маляренко, А.И. Рыскин, А.С. Щеулин // *ФТП.* - 2009. - Т.43. - С.85.
  16. Баграев Н.Т. Квантовый эффект Холла в наноструктурах на основе фторида кадмия [Текст] / Н.Т. Баграев, О.Н. Гимбицкая, Л.Е. Клячкин, А.А. Кудрявцев, А.М. Маляренко, А.И. Рыскин, А.С. Щеулин // *ФТП.* - 2009. - Т.43. - С.82.
  17. Баграев Н.Т. Квантовый спиновый эффект Холла в наноструктурах на основе фторида кадмия [Текст] / Н.Т. Баграев, О.Н. Гимбицкая, Л.Е. Клячкин, А.А. Кудрявцев, А.М. Маляренко, В.В. Романов, А.И. Рыскин, А.С. Щеулин // *ФТП.* - 2010. - Т.44. - С.1372.
  18. Bagraev N.T. Phase and amplitude response of “0.7 feature” caused by holes in silicon one-dimensional wires and rings [Text]/ N.T. Bagraev, N.G. Galkin, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2008. - V.20. - P.164202.
  19. Баграев Н.Т. Сверхпроводящие свойства кремниевых наноструктур [Текст] / Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, А.А. Кудрявцев, А.М. Маляренко, В.В. Романов // *ФТП.* – 2009. - Т.43. - С.1481.
  20. Beenakker C.W.J. Josephson current through a superconducting quantum point contact shorter than the coherence length [Text]/ C.W.J. Beenakker, H. van Houten // *Phys. Rev. Lett.* - 1991. - V.66. - P.3056.
  21. Лифшиц И.М. К теории эффекта де-Хааза — ван-Альфена для частиц с произвольным законом дисперсии [Текст] / И.М. Лифшиц, А.М. Косевич // *ДАН СССР.* - 1954. - Т.96. - С.963.
  22. Geim A.K. Mesoscopic superconductors as ‘artificial atoms’ made from Cooper pairs [Text] / A.K. Geim, I.V. Grigorieva, S.V. Dubonos, J.G.S. Lok, J.C. Maan, A.E. Filippov, F.M. Peeters, P.S. Deo // *Physica B.* - 1998. - V.249-251. - P.445.
  23. Баграев Н.Т. Гетеропереходы  $p^+-\text{Si}-n\text{-CdF}_2$  [Текст] / Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, А.С. Щеулин, А.И. Рыскин // *ФТП.* - 2005. - Т.39. - с.557.
  24. Orłowski B.A. Band structure of  $\text{CdF}_2$  from photoemission measurements [Text]/ B.A. Orłowski, J.M. Langer // *Acta Physica Polonica A.* - 1983. - V.63. - P.107.
  25. Баграев Н.Т. Квантование сверхтока и андреевское отражение в кремниевых наноструктурах [Текст] / Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин,

- А.А. Кудрявцев, А.М. Маляренко, Г.А. Оганесян, Д.С. Полоскин // ФТП. – 2009. - Т.43. - С.1496.
26. Micolich A.P. Three key questions on fractal conductance fluctuations: Dynamics, quantization, and coherence[Text]/ A.P. Micolich, R.P. Taylor, T.P. Martin, R. Newbury, T.M. Fromhold, A.G. Davies, H. Linke, W.R. Tribe, L.D. Macks, C.G. Smith, E.H. Linfield, and D.A. Ritchie // Phys. Rev. B. – 2004. - V.70. - P.085302.

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ РАБОТЫ**

1. Баграев Н.Т. Осцилляции Шубникова – де Гааза и де Гааза – ван Альфена в кремниевых наноструктурах. [Текст] / Н.Т. Баграев, Е.С. Брилинская, Д.С. Гец, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, В.В. Романов// ФТП. – 2011. - Т.45. - Вып.11. - С.1503-1508.
2. Баграев Н.Т. Эффект де Гааза - ван Альфена в наноструктурах фторида кадмия. [Текст] / Н.Т. Баграев, Е.С. Брилинская, Э.Ю. Даниловский, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, В.В. Романов // ФТП. – 2012. - Т.46. - Вып.1. - С.90-95.
3. Баграев Н.Т. Квантование характеристик продольного транспорта дырок в кремниевых наноструктурах, [Текст] / Н.Т. Баграев, Е.С. Брилинская, Д.С. Гец, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, В.В. Романов// НТВ СПбГПУ. – 2011. - Вып.2(128). - Физико-математические науки. - С.41-47.
4. Баграев Н.Т. Магнитные свойства наноструктур фторида кадмия / Н.Т. Баграев, Е.С. Брилинская, Э.Ю. Даниловский, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, В.В. Романов [Текст] // НТВ СПбГПУ. – 2011. - Вып.3(129). - Физико-математические науки. - С.38-45.
5. Баграев Н.Т. Эффекты Шубникова – де Гааза и де Гааза – ван Альфена в объемных кристаллах и низкоразмерных структурах / Н.Т. Баграев, Е.С. Брилинская, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, В.В. Романов [Текст] // НТВ СПбГПУ. – 2011. - Вып.4(130). - Физико-математические науки. - С.7-14.