

На правах рукописи

ГИМБИЦКАЯ ОЛЬГА НИКОЛАЕВНА

**СПИНОЗАВИСИМЫЕ КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В
НАНОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ФТОРИДА КАДМИЯ**

01.04.07 - физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2010

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

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук
Романов Владимир Викторович

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор
Гасумянц Виталий Эдуардович

Доктор физико-математических наук, профессор
Вывенко Олег Федорович

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Защита состоится « » октября 2010 г. в ч. мин. на заседании диссертационного совета Д212.229.29 при ГОУ 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 ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « » сентября 2010 г.

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

Ермакова Н.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Создание широкозонных полупроводниковых материалов и гетероструктур, обеспечивающих получение излучателей и фотоприемников в широком диапазоне длин волн ультрафиолетовой и видимой областей спектра, а также - быстродействующих логических элементов вычислительной техники и дисплеев нового поколения, является важным направлением полупроводниковой нано- и оптоэлектроники. Перспективным широкозонным полупроводником для этих целей является фторид кадмия (CdF_2), ширина запрещенной зоны которого, 7,8 эВ, в 1,5 раза больше чем у алмаза. Тем не менее, несмотря на простоту и воспроизводимость технологии, кристаллический CdF_2 до недавнего времени оставался вне поля зрения физики полупроводников из-за монополярного характера проводимости (n -типа) [1-3].

Впервые это ограничение было преодолено путем диффузии бора, которая позволила получить гетероструктуры $p^+-\text{Si} - n-\text{CdF}_2$ в условиях осаждения поликремния из газовой фазы на поверхность кристалла $n-\text{CdF}_2$, чему способствовало совпадение постоянных решеток ($5.43 \text{ \AA} - \text{Si}$; $5.46 \text{ \AA} - \text{CdF}_2$) и электронного сродства (4 эВ - Si, CdF_2) кремния и фторида кадмия [4, 5]. Поэтому получение сверхмелких p^+-n – переходов на поверхности кристалла $n-\text{CdF}_2$ представляется экспериментально реализуемой задачей. Кроме того, идентификация гетеропереходов $p^+-\text{Si} - n-\text{CdF}_2$ показала, что с помощью примесной диффузии из газовой фазы можно получить низкоразмерные структуры на основе фторида кадмия, которые являются достаточно перспективными для решения различных задач высокотемпературной нано- и оптоэлектроники. Особенно интересным может оказаться использование сверхмелких $p^+-n -\text{CdF}_2$ – переходов и наноструктур на их основе для экспериментальной реализации электронно-волновых аналогов электро-оптических модуляторов, наиболее ярким представителем которых является спиновый транзистор [6].

Вышесказанное определяет актуальность темы настоящей работы, в рамках которой диффузия бора использовалась для получения планарных сверхмелких p^+-n -переходов, представляющих собой сэндвич-структуры $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}/p-\text{CdF}_2\text{-QW}/\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$ на поверхности кристаллов CdF_2 n -типа проводимости. В процессе исследований полученных структур основное внимание уделялось изучению спиновой поляризации дырок, возникающей вследствие рассеяния на центрах бора, а также – возможностям ее использования в модельных приборных структурах спинтроники таких, как спиновый транзистор и холловский мостик [7, 8] для наблюдения квантового спинового эффекта Холла.

Цель работы заключалась в обнаружении и исследовании эффекта спинового транзистора и квантового спинового эффекта Холла в планарных наноструктурах на основе фторида кадмия.

В задачи работы входило изучение следующих вопросов:

1. Получение сверхузких квантовых ям CdF_2 p -типа проводимости, ограниченных сильнолегированными бором δ -барьерами, на поверхности кристалла фторида кадмия n -типа.
2. Идентификация энергетических позиций подзон двумерных дырок в квантовой яме p - CdF_2 .
3. Исследование электрических, магнитных и оптических свойств сильнолегированных бором δ - барьеров, ограничивающих квантовую яму p - CdF_2 .
4. Регистрация ВАХ высокого разрешения при различных температурах для изучения взаимосвязанности характеристик размерного квантования дырок в квантовой яме p - CdF_2 и квантования сверхтока в δ - барьерах, проявляющих свойства высокотемпературных сверхпроводников.
5. Обнаружение и исследование спиновой поляризации двумерных дырок с помощью измерений характеристик квантового эффекта Холла.
6. Идентификация ВАХ спинового транзистора и квантового эффекта Холла с помощью исследований продольной и поперечной проводимости в зависимости от напряжения вертикального затвора, управляющего величиной спин-орбитального взаимодействия в валентной зоне квантовой ямы CdF_2 p -типа.

Научная новизна работы.

1. Измерения туннельных ВАХ, температурных и полевых зависимостей сопротивления, статической магнитной восприимчивости и теплоемкости планарных сэндвич-структур $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}/p\text{-CdF}_2\text{-QW}/\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$, полученных на поверхности кристалла $n\text{-CdF}_2$, позволили идентифицировать сверхпроводящие свойства δ - барьеров $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$, ограничивающих сверхузкую квантовую яму CdF_2 p -типа проводимости.
2. Обнаружена взаимосвязанность квантования сверхтока и размерного квантования дырок в квантовой яме $p\text{-CdF}_2$, ограниченной сверхпроводящими δ - барьерами $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$.
3. Впервые, при комнатной температуре, наблюдались осцилляции Шубникова – де Гааза и квантовая лестница холловского сопротивления в квантовой яме CdF_2 p -типа проводимости на поверхности кристалла $n\text{-CdF}_2$.
4. Показано, что внутри энергетического интервала сверхпроводящей щели ВАХ спинового транзистора и квантового спинового эффекта Холла

определяются спектром многократного андреевского отражения дырок, возникающим при изменении напряжения вертикального затвора.

5. Вне интервала сверхпроводящей щели обнаруженная ВАХ квантового спинового эффекта Холла представляет собой квантовую лестницу проводимости с амплитудой ступенек равной e^2/h , которая взаимосвязана с осцилляциями продольной проводимости в зависимости от напряжения вертикального затвора, контролирующего величину спин-орбитального взаимодействия Бычкова-Рашбы.

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 спиновой интерференции в низкоразмерных полупроводниковых структурах.

Научная и практическая значимость диссертационного исследования определяется экспериментальной реализацией сверхмелких планарных p^+-n – переходов на поверхности кристалла n -CdF₂ в условиях диффузии бора; идентификацией кванторазмерных сэндвич-структур внутри p^+-n – переходов, которые представляют собой квантовые ямы p -CdF₂, ограниченные сверхпроводящими δ - барьерами, и демонстрируют взаимосвязанность размерного квантования дырок и квантования сверхтока; обнаружением квантового эффекта Холла в сэндвич-структурах при комнатной температуре; обнаружением спиновой поляризации двумерных дырок вследствие спинозависимого рассеяния на дипольных центрах бора; регистрацией эффекта спинового транзистора и квантового спинового эффекта Холла в условиях спиновой поляризации дырок в краевых каналах квантовой ямы p -CdF₂.

Защищаемые положения:

1. Низкотемпературная диффузия бора позволяет получать сверхузкие квантовые ямы CdF₂ p -типа проводимости, ограниченные δ - барьерами на поверхности кристалла фторида кадмия n -типа.
2. Сильнолегированные бором δ -барьеры, ограничивающие квантовую яму CdF₂ p -типа проводимости проявляют свойства высокотемпературных сверхпроводников, вследствие чего энергетические позиции двумерных дырочных подзон определяют характеристики квантования сверхтока.
3. Спинозависимое рассеяние дырок на центрах бора в краевых каналах квантовых ям CdF₂ p -типа проводимости, ограниченных сверхпроводящими δ -барьерами, приводит к их спиновой поляризации, которая отражается в характеристиках квантового эффекта Холла.
4. Наличие спиновой поляризации в краевых каналах квантовой ямы CdF₂ p -типа проводимости позволяет наблюдать эффект спинового

транзистора и квантовый спиновый эффект Холла, которые проявляются соответственно в осцилляциях продольной проводимости и квантовой лестнице поперечной проводимости в зависимости от напряжения вертикального затвора, управляющего величиной спин-орбитального взаимодействия. Причем энергетические позиции максимумов осцилляций продольной проводимости строго совпадают с серединами квантовых ступеней поперечной проводимости, e^2/h .

Апробация результатов работы. Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 9-й и 10-й Международных конференциях по нанофизике и нанотехнологии, ICN&T-9, ICN&T -10 (Базель, Швейцария, 2007, Стокгольм, Швеция, 2008); 17-й и 18-й Международных конференциях по электронным свойствам двумерных систем, EP2DS-17, EP2DS-18 (Генуя, Италия, 2007; Кобе, Япония, 2009); 6-й Международной конференции по квантовым вихрям в наноструктурированных сверхпроводниках, VORTEX-6 (Родос, Греция, 2009).

Публикации: по результатам исследований, изложенных в диссертации, имеется 6 публикаций в ведущих отечественных и международных журналах. Список публикаций приведен в конце диссертации.

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

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** определяется актуальность темы диссертационной работы, перечислены основные новые результаты, обосновывается их научная и практическая значимость, представлена структура диссертации и приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой обзор литературы, посвященный исследованию физических свойств полупроводниковых кристаллов CdF₂.

В первом параграфе кратко рассматриваются физические эффекты, которые наблюдались во фторидных кристаллах, легированных редкоземельными ионами. Показано, что CdF₂ - это кристалл с преимущественно ионным характером связи, обладающий фундаментальным свойством примесного полупроводника – наличием водородоподобных донорных орбиталей, характеристики которых слабо зависят от химической природы легирующей примеси. Рассмотрены основные направления применения кристаллов CdF₂, использующие такие свойства, как большую ширину запрещенной зоны и большое сродство к электрону.

Второй параграф посвящен физико-химическим аспектам получения полупроводниковых кристаллов CdF₂. В нем подробно рассмотрены

вопросы роста кристаллов CdF_2 , а также методы и технология их аддитивного окрашивания, в результате которого кристалл приобретает проводимость n -типа.

В третьем параграфе подробно рассматривается электронная структура бистабильных центров в CdF_2 . Большое внимание уделено изучению поведения DX-центров в ионных кристаллах, которое в большой степени влияет на их электрические и оптические свойства.

В конце главы формулируются **цель и задачи** диссертационной работы.

Во второй главе рассматриваются вопросы получения и идентификации p^+ - n переходов на поверхности кристалла CdF_2 n -типа.

В первом параграфе анализируются возможности введения в кристаллы фторида кадмия акцепторных центров. Показано, что одним из оптимальных путей получения дырочной проводимости кристаллов CdF_2 является замена фтора в узле решетки бором, что в данной работе осуществлялось с помощью диффузии бора из газовой фазы. Следует отметить, что в процессе легирования бором наблюдалось частичное обесцвечивание кристалла n - CdF_2 , сопровождающееся его переходом в полуизолирующий режим. Поэтому для восстановления n -типа проводимости в объеме кристалла CdF_2 , предварительно легированного иттрием в концентрации 0.15 %, применялось дополнительное термохимическое окрашивание, следующее за процессом газофазного легирования. Данная методика позволила впервые получить планарные сверхмелкие p^+ - диффузионные профили бора на поверхности кристаллов n - CdF_2 . Холловские контакты к легированной бором поверхности кристалла n - CdF_2 формировались путем напыления золота, тогда как к обратной поверхности кристалла контакты были получены в процессе низкотемпературного газофазного осаждения силицида иттербия. Кроме того, планарные p^+ - n -переходы были снабжены вертикальными затворами для измерения прямой и обратной ВАХ, а также - для туннельной спектроскопии дырочных подзон размерного квантования в сверхмелкой p^+ -области и варьирования величиной спин-орбитального взаимодействия в процессе транспорта двумерных дырок ее в плоскости

Получение p^+ - n -переходов на поверхности кристаллов CdF_2 n -типа было идентифицировано на основании данных изучения вольт-амперных характеристик (ВАХ). Прямые ветви ВАХ выявляют наличие запрещенной зоны CdF_2 , 7.8 эВ, которое определяет формирование p^+ - n -перехода.

Во втором параграфе рассматриваются эффекты туннелирования и проводится идентификация строения валентной зоны CdF_2 . Изучение поведения ВАХ высокого разрешения позволило выявить особенности строения валентной зоны CdF_2 . Полученные ВАХ высокого разрешения согласуются как с расчетами энергетического строения валентной зоны

фторида кадмия [9], так и с результатами определения плотности состояний в этой зоне, полученными методом оптической и фотоэлектронной спектроскопии [5, 10]. В частности, экситонный пик и прямые переходы $\Gamma_{15}-\Gamma_1$ и $\Gamma_{25}-\Gamma_1$ проявляются соответственно при 7.87 эВ, 8.5 эВ и 9.98 эВ, тогда как переходы, возникающие из-за наличия X_5' , и X_1 состояний валентной зоны CdF_2 , разрешаются в энергетическом интервале 10.9 ÷ 11.2 эВ. В свою очередь состояния $\text{Cd}^{2+}(4d)$ наблюдаются при значениях прямого смещения 13.27 эВ и 13.74 эВ. Наблюдаемое расщепление d-состояния, возможно, является следствием спин-орбитального расщепления или расщепления, индуцированного кристаллическим полем [5, 10].

Третья глава посвящена исследованию физических свойств наноразмерных сэндвич-структур $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}/p\text{-CdF}_2\text{-QW}/\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$ на поверхности кристалла $n\text{-CdF}_2$.

Исследования ВАХ и температурных зависимостей сопротивления в плоскости p^+ -слоев, сильнолегированных бором, на поверхности кристалла CdF_2 n -типа свидетельствуют о наличии квазидвумерного газа дырок. Эти результаты показывают, что p^+ -слои проявляют свойства сверхузких квантовых ям CdF_2 p -типа проводимости, которые ограничены δ -барьерами $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$. На важную роль прямой ветви ВАХ в идентификации характеристик квантовой ямы указывает участок отрицательного дифференциального сопротивления, который обусловлен уменьшением вероятности туннелирования дырок из квантовой ямы CdF_2 p -типа в зону проводимости $n\text{-CdF}_2$ при увеличении прямого напряжения. Значительная протяженность ВАХ до участка отрицательного дифференциального сопротивления, во-первых, указывает на соответствие глубины квантовой ямы энергетическому строению валентной зоны CdF_2 , а, во-вторых, позволяет провести детальное исследование спектра подзон двумерных дырок, результаты которого представлены в первом параграфе.

В рамках данной задачи ВАХ высокого разрешения тока и проводимости были измерены при двух значениях температуры, которые не только определили энергетические позиции дырочных подзон в квантовой яме CdF_2 p -типа, но и принесли неожиданный результат: частное от деления амплитуды каждого пика тока, измеренного при 298К, на амплитуду соответствующего ему пика проводимости, измеренного при 345К, оказалось равным одной и той же величине - $\pi\Delta/e$ (где $\Delta=51.03$ мэВ). Полученные результаты указывают на важную роль двумерных дырочных подзон в формировании «эффекта близости», который возникает вследствие андреевского отражения в так называемых сэндвич-структурах - сверхузких квантовых ямах, ограниченных сверхпроводящими барьерами [11]. В рамках «эффекта близости», пики сверхтока, I_c , ($T < T_c$, где T_c - температура перехода в сверхпроводящее состояние) определяются

энергетическим спектром двумерных дырок и взаимосвязаны с величиной соответствующих минимумов проводимости «сэндвич-структуры» в нормальном состоянии, G_N , ($T > T_c$) путем отмеченного выше фундаментального соотношения: $I_c/G_N = \pi\Delta/e$ [12]. Таким образом, на основании детального изучения ВАХ делается вывод о том, что δ -барьеры $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$, ограничивающие сверхузкую квантовую яму CdF_2 p -типа проводимости являются высокотемпературными сверхпроводниками, что определяет взаимосвязанность размерного квантования дырок и квантования сверхтока в сэндвич-структуре $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}/p\text{-CdF}_2\text{-QW}/\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$.

Далее обсуждается возможный механизм сверхпроводящих свойств δ -барьеров, сильнолегированных бором, который основан на формировании дипольных центров бора с отрицательной корреляционной энергией ($2B^0 \Rightarrow B^+ + B^-$). Так как фторид кадмия является ионным широкозонным полупроводником, при его легировании бором в условиях избытка вакансий фтора возникают практически идеальные возможности для реконструкции нейтральных атомов бора. Данная реконструкция, по-видимому, сопровождается образованием дипольных центров бора. Таким образом, в процессе диффузии бора на поверхности кристалла CdF_2 n -типа проводимости формируется последовательность квантоворазмерных $p^+ - n$ - переходов, которая представляет собой квантовую яму CdF_2 p -типа проводимости, ограниченную наноструктурированными δ - барьерами $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$.

Во втором параграфе приведены результаты исследований характеристик δ -барьеров $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$, ограничивающих квантовую яму CdF_2 p -типа проводимости. С помощью измерений туннельных ВАХ, температурных и полевых зависимостей сопротивления, статической магнитной восприимчивости и теплоемкости планарных сэндвич-структур $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}/p\text{-CdF}_2\text{-QW}/\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$, полученных на поверхности кристалла $n\text{-CdF}_2$, были идентифицированы сверхпроводящие свойства δ - барьеров $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$, ограничивающих сверхузкую квантовую яму CdF_2 p -типа проводимости. Кроме того, наличие сверхпроводящей щели было идентифицировано на основании результатов измерений туннельных ВАХ, полученных с помощью локальной туннельной спектроскопии. Причем, полученное значение энергии сверхпроводящей щели согласуется с данными измерений критической температуры при использовании вышеперечисленных методов. При этом было показано, что, в условиях прямого напряжения смещения, регистрация джозефсоновского пика тока в позиции каждой дырочной подзоны при ее прохождении через сверхпроводящую щель сопровождается наличием спектра многократного андреевского отражения.

Четвертая глава посвящена изучению квантового эффекта Холла в сэндвич-структурах $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}/p\text{-CdF}_2\text{-QW}/\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$.

В первом параграфе приведено описание классического эффекта Холла и представлены экспериментальные данные по его исследованию в исторической ретроспективе.

Второй параграф посвящен вопросам поведения двумерного электронного газа в магнитном поле. Подробно рассмотрены особенности поведения носителей заряда в сильных магнитных полях в системах с пониженной размерностью.

В третьем параграфе подробно рассмотрены экспериментальные результаты и теоретические аспекты исследований квантового эффекта Холла. На основании рассмотрения работ фон Клитцинга [7] и Лафлина [8] объясняется обнаружение кванта сопротивления h/e^2 .

В четвертом параграфе приведены результаты экспериментальных исследований квантового эффекта Холла в наноструктурах на основе фторида кадмия, проведенных при комнатной температуре. Показано, что наблюдение квантового эффекта Холла при комнатной температуре в сэндвич-структуре $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x} - p\text{-CdF}_2 - \text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$ на поверхности кристалла $n\text{-CdF}_2$, стало возможным благодаря большому энергетическому зазору между уровнями Ландау, $\hbar\omega_c$, вследствие крайне малой эффективной массы двумерных дырок в квантовой яме $p\text{-CdF}_2$, $m_{\text{eff}} = 3.44 \cdot 10^{-4} m_0$. При этом, аналогично результатам, полученным при исследовании графена [13], при комнатной температуре наблюдались осцилляции Шубникова – де Гааза и квантовая лестница холловского сопротивления. Следует отметить, что исследуемые квантовые ямы на основе CdF_2 допускают для плотности двумерных дырок вплоть до 10^{14} м^{-2} заполнение единственной двумерной подзоны, что существенно для наблюдения лестницы холловского сопротивления в относительно слабом магнитном поле. Проведенные исследования показали, что подвижность дырок, μ , при этом не меняется существенно в интервале температур от жидкого азота до комнатной, и приближение сильного поля $\omega_c \tau = \mu B \gg 1$ достигается в полях порядка нескольких десятков мТ.

Одной из причин образования двумерных дырок с крайне малой эффективной массой в сэндвич-структуре $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x} - p\text{-CdF}_2 - \text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$, которая лежит в основе регистрации квантового эффекта Холла при комнатной температуре, по-видимому, является формирование квантово-размерного p^+n – перехода. В этом случае широкая запрещенная зона CdF_2 , 7.8 эВ, практически исчезает, что приводит к инверсии дырочных и электронных состояний вблизи области p^+n – перехода. Дополнительным фактором, способствующим стабилизации данной инверсии состояний, по-видимому, является пиннинг уровня Ферми, обусловленный образованием энергетической щели вблизи валентной зоны δ -барьеров $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$. Возможны и другие версии формирования двумерных дырок с крайне малой эффективной массой вследствие их взаимодействия с дипольными

центрами бора в δ -барьерах, которые нуждаются в дальнейших исследованиях.

В пятой главе приведены результаты по обнаружению и исследованию эффекта спинового транзистора и квантового спинового эффекта Холла в сэндвич-структурах $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}/p\text{-CdF}_2\text{-QW}/\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$.

В начале главы представлен краткий обзор различных версий низкоразмерных полупроводниковых структур, в которых возможно наблюдение спинозависимого транспорта носителей тока. Показано, что в рамках классического эффекта спинового транзистора модуляция тока возникает вследствие квантовых интерференционных эффектов, а именно из-за спиновой прецессии, обусловленной спин-орбитальным взаимодействием (СОВ) в сверхузкой квантовой яме, которая является основным элементом полевого транзистора, в то время как магнитные контакты, играющие роль истока и стока, используются предпочтительно для инжекции и детектирования определенных спиновых ориентаций [6]. По аналогии с электрооптическим материалом, дифференциальный фазовый сдвиг, вносимый между $+z$ поляризованными и $-z$ поляризованными электронами, может контролироваться напряжением на вертикальном затворе полевого транзистора, которое управляет величиной СОВ в квантовой яме [6]. Предполагается, что доминирующим механизмом спинового энергетического расщепления между электронами со спинами вверх и вниз в нулевом магнитном поле является терм Бычкова-Рашбы [14, 15], учтенный в гамильтониане эффективной массы [6]. Таким образом, в рамках описанной структуры полевого транзистора может возникать модуляция тока вследствие спиновой прецессии в условиях СОВ, тем самым, идентифицируя операции спинового транзистора в зависимости от напряжения вертикального затвора. Далее отмечается, что для наблюдения эффекта спинового транзистора, по-видимому, целесообразно использовать узкие квантовые ямы p -типа проводимости. С одной стороны, значительный энергетический зазор между уровнями размерного квантования обеспечивает относительно небольшие изменения в плотности и подвижности двумерных дырок при изменении напряжения вертикального затвора, а с другой стороны, в сверхузких квантовых ямах могут возникнуть условия для их спонтанной спиновой поляризации [16, 17]. Это позволит исследовать процессы спиновой интерференции с помощью обычных контактов исток-сток без выполнения ими функций поляризатора и анализатора. В заключение представлен анализ преимуществ использования планарных сэндвич-структур для изучения спинозависимого транспорта носителей в плоскости квантовой ямы, одним из которых является наличие краевых проводящих каналов, которые могут возникать вследствие усиления сверхпроводящих свойств по периметру δ -барьеров. При этом свободные носители, по-видимому, практически

отсутствуют в плоскости квантовой ямы, и только по ее периметру процессы андреевского отражения могут способствовать их продольному транспорту. В этих условиях можно ожидать значительной спиновой поляризации носителей тока как по причине спиновой зависимости андреевского отражения, определяемой тригональной симметрией дипольных центров бора внутри δ -барьеров, так и в результате их спонтанной спиновой поляризации [16].

В первом параграфе представлены результаты по обнаружению резонансного поведения продольной ЭДС в слабом магнитном поле, перпендикулярном плоскости квантовой ямы p -CdF₂, которое свидетельствует о высокой степени спиновой поляризации двумерных дырок. В рамках предлагаемой модели резонанс продольной ЭДС возникает в точке антипересечения магнитных подуровней дипольных центров бора в возбужденном триплетном состоянии. Наличие спиновой поляризации в квантовой яме p -CdF₂ позволило обнаружить и идентифицировать ВАХ спинового транзистора на основе сэндвич-структур CdB_xF_{2-x}/p-CdF₂-QW/CdB_xF_{2-x} на поверхности кристалла n -CdF₂, который проявляется в виде соответствующих осцилляций продольной проводимости Ааронова-Кашера с амплитудой порядка e^2/h . Обнаруженные осцилляции продольной проводимости показывают, что полученная структура действительно представляет собой версию спинового транзистора, поскольку они абсолютно симметричны при изменении знака напряжения на вертикальном затворе. Кроме того, на основании измеренного периода осцилляций проводимости Ааронова-Кашера была определена величина эффективной массы тяжелой дырки, $3.44 \cdot 10^{-4} m_0$, низкое значение которой является важной основой для обнаружения спинозависимого транспорта при высоких температурах и проводит параллель между свойствами сэндвич-структур и графена [13].

Во втором параграфе рассмотрены ВАХ квантового спинового эффекта Холла в сэндвич-структурах CdB_xF_{2-x}/p-CdF₂-QW/CdB_xF_{2-x} на поверхности кристалла n -CdF₂. Показано, что высокая степень спиновой поляризации дырок в условиях спинозависимого рассеяния на дипольных центрах бора, находящихся в возбужденном триплетном состоянии, а также - многократного андреевского отражения, возникает преимущественно в краевых каналах по периметру квантовой ямы p -CdF₂. В свою очередь, наличие высокой степени спиновой поляризации дырок в краевых каналах позволяет обнаружить отличную от нуля проводимость при нулевом напряжении вертикального затвора в холловской геометрии эксперимента, которая свидетельствует о регистрации квантового спинового эффекта Холла.

Показано, что внутри энергетического интервала сверхпроводящей щели ВАХ спинового транзистора и квантового спинового эффекта Холла

определяются спектром многократного андреевского отражения дырок, возникающим при изменении напряжения вертикального затвора. В этом случае спин-орбитальное взаимодействие Рашбы является ответственным за амплитудную модуляцию данного спектра многократного андреевского отражения. Вне интервала сверхпроводящей щели обнаруженная ВАХ квантового спинового эффекта Холла представляет собой квантовую лестницу проводимости с амплитудой ступенек равной e^2/h , которая взаимосвязана с осцилляциями продольной проводимости в зависимости от напряжения вертикального затвора. Причем позиции пиков продольной проводимости в энергетической шкале вертикального затвора соответствуют середине квантовых ступенек в квантовой лестнице поперечной проводимости в холловской геометрии. Данный результат объясняется в рамках модели классического спинового транзистора в условиях спин-орбитального взаимодействия Бычкова-Рашбы с учетом наличия краевых каналов, в которых реализуется режим спинозависимого транспорта поляризованных дырок.

В **Заключении** приводятся основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Сверхмелкие p^+ - n -переходы на поверхности кристаллов n - CdF_2 были получены с помощью диффузии бора из газовой фазы.
2. Прямые ветви ВАХ p^+ - n -переходов проявляют запрещенную зону, 7.8 эВ, а также позволяют идентифицировать строение валентной зоны кристаллов фторида кадмия. Наблюдаемая ВАХ высокого разрешения находится в хорошем согласии с данными, полученными с помощью методов оптической и фотоэлектронной спектроскопии.
3. Измерения туннельных ВАХ, температурных и полевых зависимостей сопротивления, статической магнитной восприимчивости и теплоемкости планарных сэндвич-структур $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}/p$ - CdF_2 - $\text{QW}/\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$, полученных на поверхности кристалла n - CdF_2 , позволили идентифицировать сверхпроводящие свойства δ -барьеров $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$, ограничивающих сверхузкую квантовую яму CdF_2 p -типа проводимости.
4. Сравнительный анализ токовых ВАХ и ВАХ проводимости соответственно ниже и выше критической температуры сверхпроводящего перехода свидетельствует о взаимосвязанности квантования сверхтока и размерного квантования дырок в квантовой яме p - CdF_2 . Причем регистрация джозефсоновского

- пика тока в позиции каждой дырочной подзоны сопровождается наличием спектра многократного андреевского отражения.
5. Впервые наблюдались осцилляции Шубникова – де Гааза и квантовая лестница холловского сопротивления в квантовой яме p - CdF_2 , ограниченной δ -барьерами $\text{CdV}_x\text{F}_{2-x}$, на поверхности n - CdF_2 . Благодаря низкой эффективной массе двумерных дырок, наблюдение квантового эффекта Холла стало возможным при комнатной температуре.
 6. Обнаружено резонансное поведение продольной эдс в слабом магнитном поле, перпендикулярном плоскости квантовой ямы p - CdF_2 , которое свидетельствует о высокой степени спиновой поляризации двумерных дырок. В рамках предлагаемой модели резонанс продольной эдс возникает в точке антипересечения магнитных подуровней дипольных центров бора в возбужденном триплетном состоянии.
 7. Показано, что в условиях многократного андреевского отражения и спинозависимого рассеяния на дипольных центрах бора, находящихся в возбужденном триплетном состоянии, возникает высокая степень спиновой поляризации дырок в краевых каналах по периметру квантовой ямы p - CdF_2 . В свою очередь, наличие высокой степени спиновой поляризации дырок в краевых каналах позволило обнаружить отличную от нуля проводимость при нулевом напряжении вертикального затвора в холловской геометрии эксперимента, которая свидетельствует о регистрации квантового спинового эффекта Холла.
 8. Показано, что внутри энергетического интервала сверхпроводящей щели ВАХ спинового транзистора и квантового спинового эффекта Холла определяются спектром многократного андреевского отражения дырок, возникающим при изменении напряжения вертикального затвора. Вне интервала сверхпроводящей щели обнаруженная ВАХ квантового спинового эффекта Холла представляет собой квантовую лестницу проводимости с амплитудой ступенек равной e^2/h , которая взаимосвязана с осцилляциями продольной проводимости в зависимости от напряжения вертикального затвора. Причем позиции пиков продольной проводимости в энергетической шкале вертикального затвора соответствуют середине квантовых ступенек в квантовой лестнице поперечной проводимости в холловской геометрии. Данный результат объясняется в рамках модели классического спинового транзистора в условиях изменения спин-орбитального взаимодействия Бычкова-Рашбы с помощью напряжения вертикального затвора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moser F., Matz D., Lyu S., Infrared Optical Absorption in Semiconducting CdF₂:Y Crystals, *Phys. Rev.*, v.**182**, p.808 (1969).
2. Eisenbergre P., Pershan P.S., Electron-Spin-Resonance and Infrared Studies of Semiconducting, Rare-Earth-Doped CdF₂, *Phys. Rev.*, v.**167**, p.292 (1968).
3. Eisenbergre P., Pershan P.S., Feldman B.J., Microwave Magnetoabsorption at Low Temperatures in Semiconducting CdF₂, *Phys. Rev. B*, v.**4**, p.3402 (1971).
4. Баграев Н.Т., Клячкин Л.Е., Маляренко А.М., Щеулин А.С., Рыскин А.И., Гетеропереходы p⁺-Si--n-CdF₂, *ФТП*, т.**39**, с.557 (2005).
5. Orłowski B.A., Langer J.M., Band structure of CdF₂ from photoemission measurements, *Acta Physica Polonica, A*, v.**63**, p.107 (1983).
6. Datta S. and Das B., Electronic analog of the electro-optic modulator, *Appl. Phys. Lett.*, v.**56**, p.665 (1990).
7. von Klitzing K., Dorda G., Pepper M., New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance, *Phys.Rev.Lett.*, v.**45**, p.494 (1980).
8. Лафлин Р.Б., Дробное квантование, *УФН*, т.**170**, с.292 (2000).
9. Albert J.P., Jouanin C., Gout G., Electronic energy bands in the fluorite structure: CaF₂ and CdF₂, *Phys. Rev. B*, v.**16**, p.4619 (1977).
10. Poole R.T., Nicholson J.A., Liesegang J., Jenkin J.G., Leckey R.C.G., Electronic structure of ZnF₂, CdF₂, and HgF₂ studied by ultraviolet photoelectron spectroscopy, *Phys. Rev. B*, v.**20**, p.1733 (1979).
11. Klapwijk T.M., Proximity effect from an Andreev perspective, *Journal of Superconductivity Incorporating Novel Magnetism*, v.**17**, p.593 (2004).
12. Beenakker C.W.J., van Houten H., Josephson current through a superconducting quantum point contact shorter than the coherence length, *Phys. Rev. Letters*, v.**66**, p.3056 (1991).
13. Geim A.K., Novoselov K. S., The rise of graphene, *Nature Materials*, v.**6**, p.183 (2007).
14. Rashba E.I., Looking Back, *Journal of Superconductivity, Incorporating Novel Magnetism*, v.**16**, p.599 (2003).
15. Aronov A.G., Lyanda-Geller Y.B., Spin-orbit Berry phase in conducting rings, *Phys. Rev. Lett.*, v.**70**, p.343 (1993)
16. Ghosh A., Ford C.J.B., Pepper M., Beere H.E., Ritchie D.A., Possible Evidence of a Spontaneous Spin Polarization in Mesoscopic Two-Dimensional Electron Systems, *Phys. Rev. Lett.*, v.**92**, p116601 (2004).

17. Bagraev N.T., Ivanov V.K., Klyachkin L.E., Shelykh I.A., Spin depolarization in quantum wires polarized spontaneously in a zero magnetic field, *Phys. Rev. B*, v.**70**, p.155315 (2004).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. Bagraev N.T., Bovt M.I., Guimbitskaya O.N., Klyachkin L.E., Malyarenko A.M., Ryskin A.I., Shcheulin A.S., Spin-dependent transport in p^+ - CdB_xF_{2-x} – n - CdF_2 planar structures, *Journal of Physics: Conference Series*, v.61, p.p.61-65 (2007).
2. Bagraev N.T., Bovt M.I., Guimbitskaya O.N., Klyachkin L.E., Malyarenko A.M., Romanov V.V., Ryskin A.I., Shcheulin A.S., Spin transistor and spin Hall effects in p-type CdB_xF_{2-x} quantum well on the n-type CdF_2 surface, *Physica E*, v.40, p.p.1913-1915 (2008).
3. Баграев Н.Т., Гимбицкая О.Н., Клячкин Л.Е., Маляренко А.М., Шелых И.А., Рыскин А.И., Щеулин А.С., Квантовый эффект Холла в наноструктурах на основе фторида кадмия, *ФТП*, т.**43**, вып.1, с.82-84 (2009).
4. Баграев Н.Т., Гимбицкая О.Н., Клячкин Л.Е., Маляренко А.М., Шелых И.А., Рыскин А.И., Щеулин А.С., Спиновый транзистор на основе наноструктур фторида кадмия, *ФТП*, т.**43**, вып.1, с.85-94 (2009).
5. Bagraev N.T., Guimbitskaya O.N., Klyachkin L.E., Kudryavtsev A.A., Malyarenko A.M., Romanov V.V., Ryskin A.I., Shelykh I.A., Shcheulin A.S., Spin Transistor and Quantum Spin Hall Effects in CdB_xF_{2-x} - p - CdF_2 – CdB_xF_{2-x} Sandwich Nanostructures, *Physica C* (2010), doi: 10.1016/j.physc.2010.02.026.
6. Баграев Н.Т., Гимбицкая О.Н., Клячкин Л.Е., Кудрявцев А.А., Маляренко А.М., Романов В.В., Рыскин А.И., Щеулин А.С., Квантовый спиновый эффект Холла в наноструктурах на основе фторида кадмия, *ФТП*, т.**44**, вып.10, с.1372-1381 (2010).