

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Рьлькова Владимира Васильевича

**«Электронный транспорт в Si структурах с малой компенсацией при
эффекте поля в примесной зоне и монополярном фотовозбуждении»,**

представленной на соискание учёной степени

доктора физико-математических наук

по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников»

У большинства полупроводников с высоким уровнем легирования при низких температурах, когда легирующая примесь выморожена и зонная проводимость отсутствует, вклад прыжкового механизма переноса носителей заряда в общую проводимость становится доминирующим. Классический метод кинетического уравнения, используемый при рассмотрении зонной проводимости, не применим для описания прыжкового транспорта, поскольку электропроводность в этом случае определяется туннельными переходами электронов (дырок) между локализованными состояниями и носит квантовый характер. Ранее прыжковая проводимость по основным состояниям примесей длительное время рассматривалась как негативное явление, препятствующее достижению предельной фоточувствительности в примесном полупроводнике. Однако благодаря современному развитию нанотехнологий она может обеспечить высокую квантовую эффективность структур при малых их размерах, что дает возможность создания в матричном исполнении низкофоновых датчиков инфракрасного излучения среднего и дальнего (до 220 мкм) диапазонов. Именно исследования прыжковой проводимости в начале 70-х годов стимулировали развитие нового подхода в количественном описании проводимости неупорядоченных систем, в основе которого лежат методы и модели теории протекания. С практической точки зрения эти исследования способствовали прогрессу в технологии получения «чистых» легированных полупроводников (в первую очередь Si и Ge) с тщательно контролируемым примесным составом, используемых, в частности, для создания детекторов ИК диапазона для приема оптических сигналов в космосе, т.е. в условиях, когда уровень потока фонового и сигнального излучения не велик и составляет $\sim 10^7 \div 10^{12}$ фотон/(см²·с).

Диссертационная работа Рьлькова В.В. посвящена исследованию уникальных особенностей фотоэлектрических и транспортных свойств полупроводниковых структур, в которых важную роль играет прыжковая проводимость и эффект поля в примесной зоне. Известно, что фотопроводимость легированного кремния с малой степенью компенсации ($K < 10^{-3}$), который в настоящее время наиболее привлекателен для создания высокочувствительных детекторов ИК диапазона в матричном исполнении, обладает рядом принципиальных особенностей, связанных с наличием у нейтральных примесных атомов Н-подобных состояний

(D⁻ и A⁺-состояний нейтральных доноров и акцепторов, соответственно), формирующих верхнюю примесную зону Хаббарда. В диссертационной работе были впервые изучены особенности примесной фотопроводимости (ПФП) легированного p-Si ($N_A > 4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$), кинетика релаксации которой определялась захватом фотодырок в примесную A⁺-зону и прыжковым механизмом движения по ней; также были получены новые данные о специфике непрямой рекомбинации фотоносителей при малых интенсивностях фонового и сигнального возбуждений.

Для спектроскопии в легированном Si с малой компенсацией ($K < 10^{-3}$) более мелких, чем основная, сопутствующих примесей автором был развит метод термостимулированной проводимости (ТСП) и изучен эффект Френкеля-Пула для сопутствующей примеси бора в Si:Ga. Более того, в процессе реализации работы был выявлен необычный монополярный фотовольтаический эффект при примесном поглощении инфракрасного (вплоть до 30 мкм) излучения в Si:B структурах с блокированной проводимостью по примесной зоне. Обнаруженное в работе относительно слабое влияние магнитного поля на фотоотклик данных структур позволило автору предложить практическое применение ВІВ структур для магнитооптических исследований в сильных (до 60 Тл) магнитных полях. Был разработан и опробован оригинальный спектрометр с использованием квантовых каскадных лазеров для магнитооптических исследований узкозонных полупроводниковых структур, работающих в дальнем инфракрасном спектральном диапазоне.

Все выше перечисленное говорит о безусловной **актуальности и научной новизне** как темы исследований, так и полученных в работе результатов.

Диссертация состоит из Введения, 5 глав и Заключения. Работа изложена на 320 страницах, содержит 90 рисунков, 4 таблицы и список литературы, включающий 310 наименований.

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются основные цели работы, обоснованы ее научная новизна и практическая значимость, описана структура диссертационной работы и приводятся основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена исследованию кинетики релаксации примесной фотопроводимости (ПФП). Результаты, представленные в данной главе, получены при исследовании образцов на основе Si:B, который является одним из наиболее технологически отработанных легированных полупроводников с рекордно малыми степенями компенсации (до $K \sim 10^{-5}$) и выступает «классической» основой высокочувствительных приемников ИК-излучения. В результате была показана важная роль нейтральных центров в процессах рекомбинации носителей заряда, определяющих фоточувствительность слабокомпенсированного полупроводника. На примере Si:B с малой компенсацией было продемонстрировано, что кинетика релаксации ПФП при температурах выше 10 К в значительной степени контролируется прилипанием дырок к

нейтральным атомам бора. Было также установлено, что при концентрациях бора выше некоторой величины ($N_A \geq 4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$) существенно взаимодействие между нейтральными атомами В, в результате чего увеличивается характерная энергия центров прилипания, а при температурах $T \leq 7 \text{ К}$ увеличивается вклад непрямого канала рекомбинации дырок через примесную A^+ -зону за счет непрямого захвата дырок из A^+ -зоны на отрицательно заряженные акцепторы (A^- -центры). Показано также, что при относительно высоких температурах (выше 18 К), когда не прямой канал рекомбинации зонного типа несущественен, коэффициент захвата дырок на отрицательно заряженные акцепторы (A^- -центры) α^- зависит от уровня легирования - линейно возрастает с увеличением N_A . Автором было предложено объяснение роста α^- за счет неупругого захвата дырок нейтральными акцепторами, расположенными вблизи притягивающего A^- -центра, что способствует остыванию дырок в кулоновской яме, обусловленной этим центром, и создает дополнительный канал рекомбинации фотодырок, не связанный с их перемещением в A^+ -зоне.

Стоит отметить, что для легированного Si:B с малой компенсацией особенности кинетики ПФП в сильных электрических полях были изучены впервые. Было показано, что коэффициент прилипания дырок θ определяется не только концентрацией уровней прилипания N_{eff} и их глубиной ε , но и отношением α_c^0/α_e^0 , где α_c^0 - коэффициент их захвата на нейтральные центры и α_e^0 - равновесный коэффициент, которое может изменяться в условиях разогрева дырочного газа. Таким образом, в греющих электрических полях коэффициент прилипания дырок практически не изменяется до энергий дырок, равных энергии связи дырки на изолированном A^+ -центре ($\varepsilon_k \approx 2 \text{ мэВ}$), а при энергиях более 4 мэВ падает с увеличением поля приблизительно корневым образом, что объясняется уменьшением коэффициента захвата дырок на нейтральные центры по мере увеличения их энергии.

В главе 2 рассмотрены полевые эффекты в фоточувствительных структурах с заблокированной проводимостью по примесной зоне (ВІВ) на основе кремния с высоким уровнем легирования и малой степенью компенсации. Для выявления в легированном кремнии с малой компенсацией ($K \leq 10^{-3}$) более мелких, чем основная, сопутствующих примесей при их концентрации $N_S < N_{comp}$ - концентрации компенсирующих центров, был развит метод термостимулированной проводимости (ТСП). Было показано, что предложенный метод не чувствителен к процессу ударной ионизации примесей и позволяет изучать эффект Френкеля-Пула для мелкой сопутствующей примеси в Si, а в случае линейной рекомбинации он весьма эффективен как для установления химической природы сопутствующей примеси, так и для определения ее концентрации. Метод ТСП был продемонстрирован на примере выявления примеси бора в Si:Ga с $K \approx 10^{-3}$. Для сопутствующей примеси бора в Si:Ga найдена зависимость уменьшения величины энергии активации $\Delta\varepsilon$ от электрического поля и показано, что в данной

зависимости, $\Delta\varepsilon = \alpha(4e^3 E/\kappa)^{1/2}$, коэффициент $\alpha = 0.838$, т.е. заметно меньше теоретического значения $\alpha = 1$, полученного в рамках одномерной модели. Такой же величины коэффициент α получен при исследованиях спектров примесной фотопроводимости Si:B ВІВ-структур в сильных электрических полях. Таким образом, был предложен высокочувствительный метод, который может быть применим в условиях, недоступных для обнаружения сопутствующих примесей другими методами.

В Si:B ВІВ-структурах с уровнем легирования активного слоя $N_A \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ обнаружен новый механизм фототермополевой ионизации примесей, имеющий линейчатый характер и позволяющий идентифицировать природу примеси в переходной области *i*-Si/*p*-Si области ВІВ-структур. Обнаружено, что вольт-амперные характеристики Si:B ВІВ-структур с концентрацией бора в активном слое $N_A \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ демонстрируют при примесном фотовозбуждении и температурах $T < 6 \text{ К}$ пороговый характер, обусловленный ограничением фотоотклика прыжковой проводимостью активного слоя σ_{im} . Модель, основанная на представлении об эффекте Френкеля-Пула в примесной зоне, позволяет с точностью около 5% описать ВАХ ВІВ-структур в широком диапазоне экспериментальных условий и определить величину прыжковой проводимости σ_{im} в слабом поле.

Впервые исследовано влияние сильных магнитных полей (до 30 Тл) на фототклик Si:B ВІВ-структур с концентрацией примеси в активном слое ($N_A \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Установлено, что падение фотопроводимости в продольной геометрии (магнитном поле направлено параллельно электрическому полю) происходит, главным образом, из-за уменьшения коэффициента умножения дырок M_g и увеличения энергии активации прыжковой проводимости в активном слое при низких температурах в условиях ограничения фотоотклика структур прыжковым транспортом. В поперечной геометрии влияние магнитного поля на фотоотклик данных структур более существенно, что обусловлено эффектами накопления заряда в блокирующем слое ВІВ-структур из-за увеличения времени пролета дырками этого слоя, связанном с квазибаллистическим характером транспорта и сильным искривлением траекторий их движения в поперечной геометрии.

Глава 3 посвящена наблюдению монополярного фотовольтаического эффекта при примесном поглощении инфракрасного излучения. Обнаружен фотовольтаический эффект в *p*-Si:B ВІВ-структурах с концентрацией дырок в легированном (активном) слое порядка 10^{18} см^{-3} и малой толщиной (3 мкм) блокирующего слоя. Было установлено, что фотоэдс возникает при энергиях квантов больших энергии ионизации бора ($h\nu > 43 \text{ мэВ}$, что соответствует длинам волн излучения $\lambda < 30 \text{ мкм}$), причем ее величина не зависит от интенсивности фотовозбуждения при $\Phi > 10^{13} \text{ фотон}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, а ее максимальное значение V_{emf} достигает величины, определяемой энергией активации прыжковой проводимости ε_a активного слоя. Был продемонстрирован

новый подход к обнаружению ИК излучения с помощью ВІВ-структур, при котором не возникает проблемы уменьшения темновых токов и шумов, обусловленных ими. Предложена модель, описывающая основные закономерности в поведении фотоэдс при монополярном фотовозбуждении в зависимости от температуры, интенсивности и энергии квантов возбуждающего излучения, в рамках которой наблюдаемый фотовольтаический эффект объясняется особенностями энергетической диаграммы ВІВ-структур и баллистическим пролетом блокирующего слоя дырками, фотоэмитированными из контактного слоя, с последующим их остыванием в активном слое.

В главе 4 продемонстрирована возможность практического применения ВІВ структур для магнитооптических исследований в сильных магнитных полях. Был предложен и разработан компактный спектрометр на основе квантовых каскадных лазеров (ККЛ) и ВІВ фотоприемника для осуществления исследований циклотронного резонанса в сильных импульсных полях до 60 Тл. Для создания такого спектрометра было использовано преимущество ВІВ геометрий удобной для создания компактных измерительных систем на базе импульсных соленоидов, в которых направление магнитного поля совпадает с направлением падающего излучения и протекающего через фотоприемник тока (продольная геометрия). В этом случае существенно ослабляется паразитный для фотоприемника магниторезистивный эффект, а также реализуются оптимальные условия (геометрия Фарадея) для наблюдения циклотронного резонанса, играющего важную роль в исследованиях электронного энергетического спектра узкозонных полупроводников, в том числе с необычным характером энергетической дисперсии.

В результате проведенных исследований был обнаружен эффект гигантской модуляции интенсивности (в 10^3 раз) излучения ККЛ лазера магнитным полем, обусловленный межподзонными магнитофоннными резонансами (антирезонансами) в условиях квантования Ландау подзон активной области лазера. Данное наблюдение можно рассматривать как прямое доказательство формирования «фононного горла» в электронной системе на основе 0D сильно вырожденных состояний.

Предложенный спектрометр был успешно апробирован на примере исследований циклотронного резонанса в узкозонных полупроводниковых сплавах в системе $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ для составов $x = 0-0.06$, в которых была достигнута высокая точность измерений циклотронного поглощения не только по положению его максимума (лучше 1%), но и по абсолютной его величине (в пределах 10%).

Заключительная Глава 5 посвящена исследованию особенностей прыжковой проводимости в планарной геометрии. На примере транзисторных системах металл-оксид-полупроводник на основе слоев легированного слабокомпенсированного Si:B была продемонстрирована возможность наблюдения продольной (латеральной) прыжковой проводимости в темновых условиях при эффекте поля в примесной зоне (поперечный

транспорт носителей заряда в этом случае блокирован высоким потенциальным барьером на границе Si/SiO₂). Автором данной работы впервые был обнаружен дополнительный квази-двумерный канал прыжковой проводимости, который формируется в условиях пересечения уровня Ферми с объемной примесной зоной в переходной области, разделяющей ионизованные и нейтральные акцепторы. При этом изгиб зон полупроводника в области обедняющих напряжений ($V_g > 0$), необходимый для формирования квази-2D канала проводимости, зависит от уровня легирования и определяется уширением примесной зоны вследствие генерации флуктуационного потенциала ионизованными акцепторами в условиях его нелинейного экранирования носителями квази-2D канала. Было также установлено, что дырочный канал обогащения в данных объектах формируется при относительно высоких отрицательных напряжениях на полевом электроде ($V_g < 0$), изменяющихся с уровнем легирования, что обусловлено заполнением примесной A⁺-зоны в условиях квантования дырочного газа.

На основании результатов работы было показано, что за счет эффекта поля в примесной зоне в латеральной геометрии может кардинально изменяться топология перколяционных путей протекания носителей заряда, приводя к сильным мезоскопическим флуктуациям сопротивления локальных областей (эффект некогерентной мезоскопии). Так, при исследовании эффекта поля в примесной зоне Si:B МОП структур были обнаружены мезоскопические флуктуации недиагональной (холловской) компоненты тензора сопротивления R_{xy} , которые определялись перестройкой бесконечного кластера и анализ которых давал возможность экспериментальной оценки важного параметра перколяционной системы – радиуса корреляции L_c . Было установлено, что эффект мезоскопии проявляется в различии полевого поведения четной составляющей по полю поперечного $R_{xy}(B)$ и продольного $R_{xx}(B)$ сопротивлений, что позволяет оценить характерный масштаб магнито-электрических неоднородностей.

В диссертационной работе было показано, что мезоскопические флуктуации в R_{xy} носят общий характер и могут наблюдаться в других перколяционных системах в условиях, когда в результате внешнего воздействия происходит изменение перколяционных путей протекания. Мезоскопические эффекты в R_{xy} обнаружены также в магнитных перколяционных системах с активационным характером проводимости в гранулированных пленках $Fe_x(SiO_2)_{1-x}$ в интервале составов $x = 0.5-0.6$, в полупроводниковых слоях $In_{1-x}Mn_xAs$ ($x \approx 0.1$), в GaAs/ δ <Mn>/GaAs/ $In_xGa_{1-x}As$ /GaAs структурах с высоким содержанием Mn ($N_{Mn} \approx 1$ ML), обладающих эффектом гигантского отрицательного магнетосопротивления. Изучение флуктуаций недиагональной компоненты тензора сопротивления позволило получить важную информацию не только о масштабах магнито-электрических неоднородностей, но и выявить необычные особенности поведения эффекта Холла в этих перколяционных системах. Показано, что зависимость R_{xy} от магнитного поля B определяется в этих системах не только эффектом

Холла, но и в значительной степени мезоскопическим эффектом, обусловленным пространственным изменением путей протекания тока под действием магнитного поля.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы. Следует особо отметить, что полученные в работе результаты наравне с научной ценностью имеют неоспоримую **практическую значимость**. Их **надежность** и **достоверность** подтверждается воспроизводимостью полученных экспериментальных данных на большом числе объектов исследования.

Материалы диссертации достаточно полно отражены в 46 научных работах: 39 статьях в рецензируемых отечественных (25) и зарубежных (14) журналах, вошедших в Перечень, определенный Высшей аттестационной комиссией, 4 статьях в сборниках трудов международных конференций, 2 авторских свидетельствах и 1 патенте РФ.

Все основные экспериментальные результаты получены автором лично или при его непосредственном участии и руководстве. Это также касается постановки научных задач, обработки и интерпретации полученных экспериментальных данных.

Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Некоторые замечания к работе:

1. В разделе 2.2 (стр. 83) описана оригинальная криогенная приставка к транспортному сосуду Дьюара для исследования фотопроводимости полупроводниковых структур при субнановаттных потоках излучения, содержащая полупроводниковый ИК лазер и миниатюрный имитатор излучения абсолютно черного тела. Однако, на мой взгляд, результатам ее апробации (разделы 2.2.2-2.2.4) уделено слишком большое внимание, тем более что эти результаты не отражены в положениях выносимых на защиту. В частности, интересны результаты по исследованию эффекта Френкеля-Пула для мелких кулоновских примесей в сильных электрических полях с помощью развитого метода термостимулированной проводимости.
2. В разделе 4.2 (стр. 177) описан компактный терагерцовый спектрометр на основе квантового каскадного лазера для исследований циклотронного резонанса (ЦР) в сильных импульсных (до 60 Тл) магнитных полях. Однако некоторые важные характеристики спектрометра не указаны. В частности, мощность использованных лазеров и необходимые для исследования ЦР размеры объектов.
3. В разделе 5.4.2.2 (стр. 254) представлены интересные результаты по исследованию особенностей эффекта Холла в $\text{GaAs}/\delta\text{-Mn}/\text{GaAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ структурах, содержащих вблизи InGaAs квантовой ямы слой, обогащенный Mn. Однако представлены результаты, полученные на структурах только с одним, предельно высоким содержанием Mn ($N_{\text{Mn}} \approx 1 \text{ ML}$). Кроме того, отсутствуют данные по намагниченности структур.

4. В тексте диссертации и автореферата встречаются отдельные опечатки.

Все указанные замечания не настолько существенны, чтобы повлиять на общую, несомненно, высокую оценку диссертационной работы. Диссертация В.В. Рьлькова представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой впервые детально исследованы фотоэлектрические и транспортные свойства полупроводниковых структур с малой компенсацией в условиях эффекта поля в примесной зоне и монополярном фотовозбуждении. Получен ряд новых результатов, имеющих как большую научную, так и практическую значимость и их совокупность можно квалифицировать как существенный вклад в физику полупроводников. Основные результаты работы опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах и хорошо известны по докладам на многих российских и международных конференциях. Новизна и достоверность полученных результатов не вызывает сомнений.

Диссертационная работа В.В. Рьлькова удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Рьльков Владимир Васильевич, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 - «Физика полупроводников».

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник
Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе

К.Д. Моисеев
13.08.2015

Подпись К.Д. Моисеева заверяю:

Зам. директора по научной работе ФТИ им. А.Ф. Иоффе
к.ф.-м.н.,

К.Д. Лебедев

Сведения об оппоненте:

ФИО: Моисеев Константин Дмитриевич

Ученая степень: доктор физико-математических наук

Специальность: 01.04.10 - «Физика полупроводников»

Почтовый адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26

Телефон: +7(812) 292-79-29

Адрес электронной почты: Mkd@iropt2.ioffe.ru

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе

Должность: Ведущий научный сотрудник лаб. Инфракрасной оптоэлектроники

