

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Рылькова 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»

Диссертационная работа В.В.Рылькова посвящена исследованию фотоэлектрических и транспортных свойств широкого ряда полупроводниковых структур, в которых важную роль играют прыжковая проводимость и эффект поля в примесной зоне. К подобным структурам относятся: 1) примесные фотопроводники на основе легированного Si с малой компенсацией и фоточувствительные Si структуры с заблокированной прыжковой проводимостью (BIB – структуры от английского “blocked impurity band structures”), которые используются для разработки матричных высокочувствительных датчиков длинноволнового (до ~ 30 мкм) ИК-диапазона с числом элементов до $\sim 10^6$, играющих, в частности, ключевую роль в исследованиях космического пространства; 2) транзисторные Si структуры металл-оксид-полупроводник (МОП) со встроенным каналом проводимости, применяемые в качестве входных каскадов в устройствах криоэлектроники; 3) двухкомпонентные магнитные системы с гигантским отрицательным магнетосопротивлением и туннельным характером электронного переноса, перспективные для создания устройств спинтроники.

При малой компенсации полупроводника ($K \leq 10^{-4}$) существенную роль играет захват фотоносителей в ионные состояния нейтральных атомов легирующей примеси с образованием $D^-(A^+)$ – центров. В этих условиях рекомбинационные характеристики материала и времена релаксации примесной фотопроводимости (ПФП) могут целиком определяться захватом фотоносителей в примесную $D^-(A^+)$ -зону и движением по ней (например, прыжковым, в зависимости от степени делокализации D^- , A^+ -состояний). В работе впервые изучена кинетика релаксации ПФП в наносекундном диапазоне (~ 10 нс), возбуждаемой полупроводниковым ИК лазером

($\lambda = 5-25$ мкм) при слабой стационарной фоновой подсветке; получены новые сведения об особенностях не прямой рекомбинации фотоносителей с участием $D^-(A^+)$ – состояний.

Впервые в работе изучен механизм фотопроводимости Si ВІВ структур с малой компенсацией в экстремальных условиях: в слабых электрических полях в отсутствие разогрева электронов проводимости, а также при низких температурах в режиме ограничения фотоотклика структур прыжковой проводимостью. При этом был обнаружен необычный монополярный фотовольтаический эффект, наблюдаемый в ВІВ-структурах вплоть до длины волны излучения ~ 30 мкм, а также выявлен эффект Френкеля-Пула в примесной зоне ВІВ-структур.

Обнаруженное в ходе работы над диссертацией относительно слабое влияние магнитного поля на фотоотклик Si:В ВІВ структур стимулировало эксперименты по изучению возможности их использования для магнитооптических исследований в сильных (до 60 Тл) импульсных полях, в частности, квантовых каскадных лазеров (ККЛ). В результате этих исследований был обнаружен эффект «фононного горла» в электронной системе на основе 0D сильно вырожденных состояний в условиях квантования Ландау, обуславливающий гигантскую модуляцию (до $\sim 10^3$ раз) интенсивности излучения ККЛ магнитным полем.

В работе фактически впервые на примере Si:В МОП структур с малой компенсацией изучены особенности электронного переноса при низких температурах в условиях эффекта поля в примесной зоне, сопровождаемого генерацией флуктуационного кулоновского потенциала. При этом был обнаружен квази-2D канал прыжковой проводимости, который формируется в области сближения (пересечения) уровня Ферми с примесной зоной, а также выявлены мезоскопические флуктуации недиагональной (холловской) компоненты тензора сопротивления R_{xy} («мезоскопический» эффекта Холла), которые наблюдались в объектах с размерами, существенно превышающими размер ячейки перколяционного кластера.

Существенно, что некоторые обнаруженные в работе явления носят довольно общий характер. В частности, явление «мезоскопического» эффекта Холла, обнаруженное в Si:В МОП структурах в режиме прыжковой проводимости, наблюдается, как было установлено автором диссертации, и в других

перколяционных системах, например, в системах с гигантским магнетосопротивлением и туннельным (прыжковым) характером переноса, в которых в результате действия магнитного поля происходит перестройка путей протекания. Изучение флуктуаций R_{xy} в диссертационной работе позволило получить важную информацию не только о масштабах магнито-электрических неоднородностей, но и об эффекте Холла, который демонстрирует необычное поведение в двухкомпонентных магнитных системах в режиме перколяционной проводимости.

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. Перейду к краткому изложению содержания диссертационной работы, акцентируя внимание на важнейших из полученных автором новых результатов.

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

Глава 1 посвящена исследованию кинетики релаксации примесной фотопроводимости (ПФП) легированного слабокомпенсированного Si. Исследования релаксации ПФП выполнены в наносекундном диапазоне на примере Si:B с рекордно малыми степенями компенсации ($K \sim 10^{-5}$). Обнаружено, что при концентрациях бора выше некоторой величины $N_A \geq 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ($N_A^{-1/3} \leq 3 \cdot a_i$, где a_i – боровский радиус A^+ -состояния атомов бора) захват фотовозбужденных дырок происходит на пары нейтральных центров бора, в результате чего характерная энергетическая глубина уровней прилипания увеличивается. Установлено, что при относительно высоких температурах ($\sim 18 \text{ K}$), когда непрямой канал рекомбинации через A^+ -зону несущественен, коэффициент захвата дырок на отрицательно заряженные акцепторы (A^- -центры) α^- линейно возрастает с увеличением уровня легирования. Автором развита модель, в рамках которой рост α^- объясняется неупругим захватом дырок нейтральными акцепторами, расположенными вблизи притягивающего A^- -центра;

такой захват способствует остыванию дырок и обуславливает дополнительный канал их рекомбинации, не связанный с перемещением дырок в A^+ -зоне.

Впервые на примере легированного слабокомпенсированного Si:B изучено поведение коэффициента захвата дырок на нейтральные центры в греющих электрических полях. Показано, что коэффициент захвата увеличивается с ростом энергии дырок до энергий, равных энергии связи дырки в изолированном A^+ -центре ($\bar{\varepsilon}_k \approx \varepsilon_i = 2$ мэВ), а при $\bar{\varepsilon}_k \geq 2\varepsilon_i$ падает степенным образом вследствие уменьшения коэффициента захвата дырок на нейтральные центры. Существенно, что результаты эксперимента подтверждаются вариационными расчетами, учитывающими конечный размер потенциала нейтрального центра и коротковолновый характер электрон-фононного взаимодействия.

В **Главе 2** рассмотрены результаты исследований в сильных электрических и магнитных полях фотопроводимости ВІВ-структур на основе Si:B и Si:As с высоким уровнем легирования ($\sim 10^{18}$ см⁻³) и малой компенсацией ($K \leq 10^{-4}$), в которых реализуется эффект поля в примесной зоне, позволяющий подавить непрямой канал рекомбинации фотоносителей с участием нейтральных центров. Обнаружено, что вольт-амперные характеристики (ВАХ) ВІВ-структур демонстрируют при низких температурах (≤ 6 К) особенности, связанные с влиянием электрического поля на энергию активации прыжковой проводимости. Модель, основанная на представлениях об эффекте Френкеля-Пула в примесной зоне, позволяет в пределах $\approx 5\%$ описать ВАХ ВІВ структур в широком диапазоне экспериментальных условий и определить величину прыжковой проводимости в слабом поле. Интересен также результат по наблюдению в Si:B ВІВ-структурах нового механизма приповерхностной фототермополевой ионизации примесей. В условиях его проявления спектр ПФП имеет линейчатый характер и позволяет идентифицировать природу примеси в переходной i -Si/ p -Si области ВІВ-структур.

Впервые исследовано влияние сильных магнитных полей (до 30 Тл) на фотоотклик Si:B ВІВ-структур ($N_A \approx 10^{18}$ см⁻³). Выявлены условия, при которых фототок может убывать в несколько раз и падение носит монотонный характер в полях до 30 Тл.

Глава 3 посвящена описанию обнаруженного в работе необычного монополярного фотовольтаического эффекта, проявляющегося в Si:B ВІВ-структурах с малой толщиной (3 мкм) блокирующего слоя. Фотоэдс возникает при энергиях квантов, превышающих энергию ионизации атомов бора ($\lambda \leq 30$ мкм), причем величина фотоэдс не зависит от интенсивности фотовозбуждения (при $\Phi > 10^{13}$ фотон/см²·с) и в пределе низких температур близка к энергии активации прыжковой проводимости ε_3 активного слоя. Развита модель, в рамках которой фотовольтаический эффект объясняется баллистическим пролетом блокирующего слоя фотодырками, их быстрым остыванием в активном слое, а также наличием потенциального барьера $\sim \varepsilon_3$ между активным и блокирующим слоями.

В главе 4 продемонстрирована возможность использования ВІВ-структур для магнитооптических исследований твердотельных объектов в сильных импульсных магнитных полях (до 60 Тл), в частности, изучения квантовых каскадных лазеров (ККЛ) и циклотронного резонанса. Обнаружен эффект гигантской модуляции интенсивности излучения ($\sim 10^3$ раз) ККЛ магнитным полем, обусловленный межподзонными магнитофононными резонансами (антирезонансами) и является следствием формирования «фононного горла» в электронной системе на основе 0D сильно вырожденных состояний в условиях квантования Ландау.

Заключительная **Глава 5** посвящена исследованию транспортных свойств МОП на основе тонких слоев легированного слабокомпенсированного Si:B ($N_A = 10^{17} - 10^{18}$ см⁻³) в области прыжковой проводимости при эффекте поля в примесной зоне. В этих условиях впервые был обнаружен квази-2D канал прыжковой проводимости, который формируется в области пересечения уровня Ферми с примесной зоной. Оказалось, что энергия активации квази-2D канала прыжковой проводимости зависит от уровня легирования и определяется уширением примесной зоны вследствие генерации флуктуационного потенциала (ФП) ионизованными акцепторами в условиях нелинейного экранирования ФП носителями квази-2D канала. Флуктуационная природа уширения примесной зоны подтверждена результатами исследований зависимости проводимости квази-2D канала σ от продольного электрического поля E ,

которая, как было установлено, хорошо описывается представлениями о неомических свойствах неупорядоченных систем со случайным кулоновским потенциалом.

При исследованиях эффекта поля в примесной зоне Si:B МОП структур в холловской геометрии обнаружены мезоскопические флуктуации недиагональной компоненты тензора сопротивления R_{xy} , имеющие квазипериодический характер при изменении напряжения на полевом электроде. Установлено, что флуктуации R_{xy} определяются перестройкой проводящих цепочек, образующих бесконечный кластер, что дает возможность экспериментальной оценки важного параметра перколяционной системы – радиуса корреляции кластера L_c .

В результате выполненных исследований показано, что мезоскопические флуктуации в R_{xy} имеют общий характер и наблюдаются в перколяционных системах в условиях, когда в результате внешнего воздействия происходит изменение путей протекания. В частности, мезоскопические эффекты в поперечном сопротивлении обнаружены в магнитных перколяционных системах, обладающих гигантским отрицательным магнетосопротивлением. Изучение этих флуктуаций позволило получить важную информацию не только о масштабах магнито-электрических неоднородностей, но и выявить необычный характер эффекта Холла: 1) минимум в концентрационной зависимости тангенса холловского угла, наблюдаемый в $\text{Fe}_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ нанокompозитах на диэлектрической стороне перколяционного перехода; 2) преобладание аномального эффекта Холла (АЭХ) в парамагнитной области температур над ферромагнитным АЭХ, обнаруженное в слоях $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ ($x \approx 0.1$) и 3) гигантский рост холловской концентрации дырок (до $\approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$) в окрестности ФМ перехода в $\text{GaAs}/\delta\langle\text{Mn}\rangle/\text{GaAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ гетероструктурах с высоким содержанием Mn ($N_{\text{Mn}} \approx 1 \text{ ML}$).

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Перечисленные выше результаты диссертации являются **новыми** и представляют собой важный вклад в физику полупроводников. Их **надежность** и **достоверность** подтверждается воспроизводимостью данных на большом числе объектов исследования. О надежности результатов исследований свидетельствуют также: 1) использование автоматизированных прецизионных методик при получении

экспериментальных результатов; 2) качественное и количественное согласие экспериментальных данных с теоретическими представлениями, вытекающими из оригинальных и общепринятых физических моделей; 3) согласие полученных результатов с данными независимых работ в областях перекрытия условий экспериментов.

Полученные в работе результаты, безусловно, имеют и **практическую значимость**. В частности, они могут быть использованы при разработке матричных высокочувствительных датчиков среднего и дальнего ИК диапазонов на основе структур с блокированной прыжковой проводимостью (ВІВ-структур), а также Si МОП транзисторов со встроенным каналом проводимости, используемых в качестве входных каскадов в устройствах криоэлектроники. Изучение обнаруженных в работе мезоскопических флуктуаций поперечного сопротивления позволило разработать новый метод оценки характерного масштаба магнито-электрических неоднородностей перколяционной системы, когда этот масштаб определяется радиусом корреляции кластера и не может быть найден непосредственно из электронно-микроскопических исследований.

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-х 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 касается также постановки научных задач, обработки и интерпретации полученных экспериментальных данных.

Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа не свободна от **недостатков**

1. При исследовании кинетики примесной фотопроводимости в слабокомпенсированном Si:B с увеличением уровня легирования обнаружен переход от захвата фотодырок на изолированные нейтральные атомы бора к захвату на пары ближайших нейтральных акцепторов с образованием A_2^+ -комплексов (§1.4). Такой

переход следует ожидать в системе короткодействующих потенциалов с «горизонтальным» беспорядком, изученным И.М. Лифшицем. В этом случае существенную роль должны играть флуктуации потенциала заряженных примесей, обусловленные компенсацией полупроводника. Однако, этот вопрос не исследован в работе.

2. Интересными представляются результаты по обнаружению немонотонного температурного поведения аномального эффекта Холла (АЭХ) в магнитных слоях $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ с фазовым расслоением - на ферромагнитные и компенсированные парамагнитные области (§5.4.2.1). Результат этот получен для больших содержаний Mn ($x \approx 0.1$). В то же время автор оставил без внимания вопрос об изменении поведения АЭХ по мере уменьшения x и гомогенизации системы.

3. Предположение о сильной плоскостной магнитной анизотропии в $\text{GaAs}/\delta\langle\text{Mn}\rangle/\text{GaAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ в структурах типа квантовых ям с высоким содержанием Mn (§5.4.2.2) не подтверждено данными магнитных измерений.

4. В тексте диссертации и автореферата встречаются отдельные опечатки.

Выводы. Все указанные замечания не настолько существенны, чтобы повлиять на общую, несомненно, высокую оценку диссертационной работы. Диссертация В.В. Рылькова является законченной научно-квалификационной работой, в которой впервые детально исследованы фотоэлектрические и транспортные свойства полупроводниковых структур с малой компенсацией в условиях эффекта поля в примесной зоне и монополярном фотовозбуждении. Доклады автора на конференциях и семинарах, большое количество статей, опубликованных в отечественных и зарубежных журналах высокого рейтинга, дают основание утверждать, что В.В. Рыльков является признанным специалистом- экспериментатором в области исследований фотоэлектрических явлений и явлений переноса (эффекта Холла, магнетосопротивления и др.) в структурах на основе легированных полупроводников, в том числе сильно неупорядоченных магнитных системах с перколяционным характером проводимости. Защищаемые автором научные результаты прошли широкое обсуждение и хорошо известны научной общественности в нашей стране и за рубежом. Новизна и достоверность полученных результатов не вызывает сомнений.

Диссертационная работа В.В. Рылькова удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 - «Физика полупроводников».

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н., профессор, академик РАН,
заведующий кафедрой физики
конденсированного состояния,
Президент Московского государственного
университета информационных технологий,
радиотехники и электроники



А.С. Сигов

14.07.2015

Сведения об оппоненте:

ФИО: Сигов Александр Сергеевич

Ученая степень: доктор физико-математических наук

Специальность: 01.04.07 - «Физика конденсированного состояния»

Почтовый адрес: 119454 г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78

Телефон: +7 (495) 434-74-74

Адрес электронной почты: sigov@mirea.ru

Наименование организации: Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники

Должность: Президент, заведующий кафедрой