

## ОТЗЫВ

официального оппонента члена-корреспондента РАН  
Сибельдина Николая Николаевича  
на диссертацию Рылькова Владимира Васильевича  
«Электронный транспорт в Si структурах с малой компенсацией при  
эффекте поля в примесной зоне и монополярном фотовозбуждении»,  
представленную 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 свойства широкого круга полупроводниковых структур, в которых важную роль играют прыжковая проводимость и эффект поля в примесной зоне. Эти исследования были начаты автором около 30 лет тому назад. К этому времени проводимость по примесной зоне была исследована в целом ряде полупроводников и сложились определенные представления о формировании электронного спектра примесных полупроводников при различных концентрациях основной и компенсирующей примесей, механизмах протекания электрического тока, оптических свойствах и пр. Вместе с тем, многие важные свойства примесных полупроводников оставались практически не исследованными. В частности, имелись лишь отрывочные сведения о механизме и динамике проводимости при примесном (монополярном) фотовозбуждении, в том числе в условиях эффекта поля, который приводит к пространственному перераспределению носителей заряда в примесной зоне. Следует заметить, что примесная зона сложный объект; ее структура зависит от взаимного расположения примесных атомов в различных зарядовых состояниях, которое имеет стохастический характер. Поэтому детальная информация о процессах захвата примесными атомами свободных носителей заряда, созданных монополярным фотовозбуждением, и их релаксации в примесной зоне имеет фундаментальное значение. С прикладной точки зрения, результаты этих исследований могут быть использованы при разработке высокочувствительных фотоприемников (в том числе, матричных) среднего и дальнего ИК диапазона.

На начальном этапе объектом исследований автора служили примесные фотопроводники на основе легированного Si с малой компенсацией. По мере развития работы исследования распространялись на другие материалы и структуры, выбор которых, с одной стороны, отвечал общей теме диссертации, а с другой – современному, на соответствующий момент, уровню науки и технологий. В результате, в рецензируемой работе были изучены следующие объекты: 1) фоточувствительные Si структуры с блокированной прыжковой проводимостью (BIB-структуры от английского «blocked impurity band structures»), которые используются для разработки матричных высокочувствительных

датчиков среднего (до  $\sim 30$  мкм) ИК-диапазона с числом элементов до  $\sim 10^6$ , играющих, в частности, ключевую роль в исследованиях космического пространства; 2) транзисторные Si структуры металл-окисел-полупроводник (МОП) с встроенным каналом проводимости, применяющиеся 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.

Подытоживая сказанное, можно заключить, что выполненные В.В. Рыльковым исследования весьма **актуальны** и имеют несомненный **научный и практический интерес**.

**Новизна** представленной диссертационной работы характеризуется целым рядом **новых значимых результатов**, полученных в ходе ее выполнения (некоторые из них будут приведены ниже), выбором объектов исследования, использованием оригинальных подходов и методик. Следует особо отметить, что получение адекватной информации из транспортных и фотоэлектрических измерений в области проводимости по примесной зоне представляет собой не простую задачу, поскольку проводимость образца может изменяться под действием фонового теплового излучения. Диссертант успешно обошел это затруднение, сконструировав и изготовив специальные вставки в транспортный гелиевый сосуд Дьюара, снабженные замкнутой измерительной ячейкой, в которую помещались исследуемый образец, полупроводниковый лазер для его возбуждения и источник контролируемой фоновой подсветки (лампочка накаливания с Ge фильтром или миниатюрный имитатор абсолютно черного тела). Характерная особенность диссертации В.В. Рылькова – детальное описание разработанных и использованных экспериментальных методик, собранных установок, исследованных образцов, включая технологии их изготовления и методы характеристики, а также скрупулезное обсуждение экспериментальных данных, тщательное их сопоставление с результатами расчетов и, там где это было возможно, с данными, полученными другими методами.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Она изложена на 320 страницах, содержит 90 рисунков, 4 таблицы и список литературы из 310 наименований.

Во Введении сформулированы цели работы, обоснована ее актуальность, показаны новизна и практическая важность полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту. В Заключении представлены основные результаты диссертационной работы. Кроме того, в конце каждой из глав диссертации даны краткие выводы, подытоживающие описанные в них исследования.

В **первой главе** диссертации описаны исследования кинетики релаксации примесной фотопроводимости (ПФП) легированного бором слабо компенсированного кремния ( $N_A = 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $K = (0,3 - 2) \cdot 10^{-4}$ ) в наносекундном диапазоне. В начале этой главы изложены

основные физические представления о примесной фотопроводимости в материалах с подобными параметрами. Затем описаны разработанная и собранная автором автоматизированная установка для изучения быстрых релаксационных процессов в примесных фотопроводниках и вставка в транспортный гелиевый дьюар с измерительной ячейкой. Далее следует феноменологическое рассмотрение кинетики примесной фотопроводимости на основе уравнений, учитывающих обмен неравновесными дырками между валентной и примесной зонами, а также между верхней и нижней зонами Хаббарда. В последующих четырех параграфах приведены результаты экспериментальных исследований зависимости эффективной глубины верхней зоны Хаббарда ( $A^+$ -зоны) от концентрации примесей, релаксации фотодырок через состояния этой зоны и дырочной проводимости по ней, а также захвата дырок отрицательно заряженными и нейтральными акцепторами в слабых и греющих электрических полях. Здесь же дано детальное обсуждение полученных результатов и их сопоставление с рассмотренной теоретической моделью.

Основным результатом описанных в этой главе исследований является установление роли положительно заряженных и нейтральных акцепторов в релаксации монополярной фотопроводимости. При температурах вымораживания примесей ( $T \leq 18$  К) последние могут служить центрами прилипания и при  $T \geq 10$  К время релаксации ПФП (медленная составляющая – десятки, а при более низких температурах – сотни нс) в значительной степени определяется этим обстоятельством. Причем при концентрациях бора  $N_A > 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  взаимодействие между нейтральными акцепторами приводит к увеличению характерной энергии центров прилипания. В условиях взаимодействия примесных атомов при низких температурах ( $T < 7$  К) возможен перенос дырок по  $A^+$ -зоне к отрицательно заряженным акцепторам, который приводит к появлению быстрой составляющей в кинетике релаксации ПФП.

**Вторая глава** диссертации посвящена исследованиям ВІВ-структур на основе Si:B и Si:As с высоким уровнем легирования и малой компенсацией в сильных электрических и магнитных полях. В этих структурах активная область (толстый слой легированного полупроводника) отделена от электрического контакта блокирующим слоем (тонкий нелегированный слой того же полупроводника). Глава начинается с рассмотрения особенности ПФП в ВІВ-структурах. Затем описана конструкция криогенной приставки к транспортному сосуду Дьюара, измерительная ячейка которой содержит полупроводниковый ИК лазер и миниатюрный имитатор излучения абсолютно черного тела и может быть использована для исследования ПФП при субнановаттных потоках излучения. Далее описаны измерения и изложены результаты определения коэффициента фотоэлектрического усиления образцов Si:Ga, выявления методом термостимулированной проводимости (ТСП) в данных образцах малых количеств более мелких, чем Ga.

сопутствующих примесей (СП), изучения эффекта Френкеля-Пула для СП бора в сильных электрических полях и вольт-амперных характеристик (ВАХ) Si:As и Si:B ВІВ-структур, спектральных исследований ПФП Si:B ВІВ-структур, изучения магнитопольевой зависимости ПФП ВІВ-структур на основе Si:B в импульсных полях до 30 Тл.

Из ряда представленных в этой главе **новых результатов** выделим следующие.

Реализован метод ТСП для выявления в легированном Si с малой степенью компенсации ( $K \leq 10^{-3}$ ) более мелких, чем основная, СП при их концентрации, меньшей плотности компенсирующих центров, т.е. в условиях, при которых обнаружение СП недоступно для других методов.

Обнаружены проявления эффекта типа Френкеля-Пула в примесной области, выражающиеся в уменьшении энергий активации примесной и прыжковой ( $\epsilon_3$ ) проводимостей в сильном электрическом поле, характере ВАХ (темновых и в условиях ИК подсветки) ВІВ-структур с сильно легированным активным слоем (концентрация бора  $N_A \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) при низких температурах ( $T \leq 6 \text{ К}$ ), особенностях формирования при обратных напряжениях смещения линейчатого спектра ПФП, отвечающего фототермополевой ионизации примесей в переходной области между активным и блокирующим слоями.

Установлено, что при низких температурах падение фотопроводимости Si:B ВІВ-структур ( $N_A \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) в магнитном поле, параллельном направлению тока (продольная геометрия), в достаточно сильных электрических полях происходит, главным образом, из-за уменьшения коэффициента умножения дырок и увеличения энергии активации прыжковой проводимости в активном слое в условиях ограничения фотоотклика прыжковым транспортом. В поперечной геометрии фотоотклик структуры значительно сильнее (более, чем на порядок, при  $T = 4,2 \text{ К}$ ) уменьшается в магнитном поле вследствие накопления заряда в блокирующем слое.

В **третьей главе** описаны эксперименты, в которых автором обнаружен фотовольтаический эффект в Si:B ВІВ-структурах с малой толщиной (3 мкм) блокирующего слоя при примесном поглощении ИК излучения. Описаны образцы и методы исследований, изложены их результаты, предложен механизм возникновения фотовольтаического эффекта. Установлено, что фотоэдс возникает при энергиях квантов, больших энергии ионизации атомов бора. Ее величина не зависит от интенсивности фотовозбуждения (при интенсивностях, больших  $10^{13} \text{ фотон/см}^2\text{с}$ ) и в пределе низких температур близка к энергии активации прыжковой проводимости  $\epsilon_3$  в активном слое.

Фотовольтаический эффект возникает благодаря наличию потенциального барьера высотой  $\approx \epsilon_3$  между активным и блокирующим слоями и объясняется баллистическим

пролетом блокирующего слоя дырками, фотоэмитированными из контакта, с последующим их остыванием в активном слое.

Обнаружение и объяснение фотовольтаического эффекта в ВІВ-структурах – основной результат представленных в этой главе исследований.

**Четвертая глава** диссертации посвящена исследованиям квантового каскадного лазера (ККЛ) в сильных (до 60 Тл) импульсных магнитных поля, параллельных оси роста структуры, в том числе, с использованием ВІВ-структур в качестве детектора его излучения. Здесь изложены физические основы работы ККЛ, описаны исследовавшиеся образцы, экспериментальная установка для магнитооптических исследований ККЛ, включающая компактную оптическую измерительную ячейку, выполненную в виде приставки к импульсному соленоиду, приведены результаты наблюдений и дано их объяснение. Полученные результаты были использованы при разработке компактного терагерцового спектрометра для исследований циклотронного резонанса (ЦР) в сильных импульсных магнитных полях, который был опробован в исследованиях ЦР в сплавах  $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$  ( $x = 0 \div 0.06$ ).

Основной **новый результат** описанных в этой главе исследований – обнаружение гигантской модуляции мощности излучения ККЛ при изменении индукции магнитного поля, обусловленной межподзонными магнитофоннными резонансами и антирезонансами в условиях квантования Ландау.

**Практически важный результат** этих исследований – разработка и реализация компактного терагерцового спектрометра на основе ККЛ для исследований ЦР в сильных магнитных полях.

Заключительная, **пятая глава** диссертации фактически состоит из двух частей. Первая из них посвящена исследованию транспортных свойств структур металл-оксид-полупроводник (МОП) на основе тонких слоев легированного слабо компенсированного Si:B в области прыжковой проводимости при эффекте поля в примесной зоне. Здесь описаны использовавшиеся структуры и результаты исследований формирования в них квази-2D канала прыжковой проводимости при положительной полярности напряжения на полевом электроде, а также особенности формирования дырочного канала обогащения при отрицательных управляющих напряжениях. Рассмотрены результаты исследований зависимости прыжковой проводимости квази-2D канала от продольного электрического поля. Описаны транспортные свойства МОП структур с  $N_A \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , изготовленных в форме двойного холловского креста, в слабых и сильных продольных электрических полях, включая флуктуации холловской компоненты  $R_{xy}$  тензора сопротивления. Изложены результаты экспериментов по исследованию флуктуаций поперечного сопротивления  $R_{xy}$  в

режиме транспорта свободных дырок, обнаруженных в МОП структурах с  $N_A \approx 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при относительно высоких температурах ( $T \approx 80 \text{ K}$ ).

Из представленных в этой части **новых результатов** выделим следующие.

Обнаружен дополнительный квази-2D канал прыжковой проводимости, который формируется в условиях пересечения уровня Ферми с объемной примесной зоной в переходной области, разделяющей ионизованные и нейтральные акцепторы. Энергия активации проводимости канала зависит от уровня легирования и определяется уширением примесной зоны вследствие флуктуаций потенциала поля ионизованных акцепторов в условиях нелинейного экранирования этих флуктуаций носителями квази-2D канала.

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

Во второй части этой главы изложены результаты исследования эффекта Холла и мезоскопических флуктуаций недиагональной компоненты тензора сопротивления в перколяционных системах с отрицательным гигантским магнетосопротивлением: гранулированных пленках Fe/SiO<sub>2</sub>, магнитных слоях In<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>As ( $x \approx 0,1$ ), гетероструктурах GaAs/ $\delta$ <Mn>/GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs с высоким содержанием Mn.

Установлено, что во всех этих структурах наблюдаются флуктуации холловского сопротивления  $R_{xy}$ . Полученные результаты и их анализ позволили заключить, что наличие мезоскопических флуктуаций  $R_{xy}$  является общим свойством перколяционных систем с активационным характером проводимости, проявляющимся в условиях, когда в результате внешнего воздействия (например, магнитного поля) изменяются пути протекания тока.

Следует также отметить обнаружение автором необычных особенностей в поведении эффекта Холла в этих магнитных перколяционных системах: наличие минимума тангенса холловского угла в нанокompозитах Fe<sub>x</sub>(SiO<sub>2</sub>)<sub>1-x</sub> на диэлектрической стороне перколяционного перехода; большую, чем в ферромагнитной области, величину аномального эффект Холла в слоях In<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>As в парамагнитной области температур; сильный рост холловской концентрации дырок (до  $\approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ) в окрестности ферромагнитного перехода в структурах GaAs/ $\delta$ <Mn>/GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs.

Подытоживая сказанное при изложении содержательной части диссертации, следует заключить, что ее автором получен целый ряд **новых значимых результатов**. Их

**достоверность и обоснованность**, также как и **обоснованность основных положений, выносимых на защиту**, не вызывают сомнений.

Вместе с тем, следует высказать несколько замечаний.

1. Длительность заднего фронта импульса излучения полупроводникового лазера несколько меньше 3-х нс (см. обсуждение на стр. 38 и рис. 1.3). Время релаксации ПФП, определенное из кинетической зависимости, показанной на рис. 1.2, составляет 3,2 нс. Возникает вопрос о точности определения реального времени релаксации ПФП при таком соотношении времен.

2. При обсуждении на стр. 261 зависимостей, представленных на рис. 5.25, сказано, что температура Кюри  $T_C$ , определенная по положению  $T_R$  максимумов этих кривых ( $T_C \approx T_R$ ), для образцов 1-3 составляет 46 К. В то же время, при обсуждении рис. 5.26 на стр. 262 под  $T_R$ , по-видимому, понимается положение максимумов температурных зависимостей холловской концентрации дырок  $p_H(T)$ , которые расположены вблизи  $T \approx 25$  К. Следовало бы прокомментировать это различие. Связано ли второе  $T_R$  с температурой Кюри? Кроме того, возрастание в окрестности ферромагнитного перехода  $p_H(T)$  почти в 2 раза (рис. 5.26) навряд ли можно назвать гигантским, как определяет его автор.

3. Объем Главы 5 диссертации непомерно велик (93 страницы; суммарный объем глав 1-4 составляет 158 страниц). На мой взгляд, ее следовало бы разбить на две главы, вынеся описание исследований магнитных материалов в шестую главу.

4. Опечатка на стр. 40: в тексте переход 4 описан, как «термический выброс дырок с нейтральных акцепторов», хотя вместо слова «нейтральных» надо было написать – положительно заряженных (см. рис. 1.4).

5. Почему-то в оглавлении и в тексте диссертации перед номерами глав 3-5 опущено слово Глава.

Высказанные замечания носят частный характер и не могут 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. Результаты работы опубликованы в высоко рейтинговых отечественных и зарубежных журналах (39 статей), а также в трудах конференций (4 статьи), и хорошо известны специалистам. Защищаемые автором научные положения докладывались на многих международных и отечественных конференциях. Практическая важность полученных результатов подтверждается двумя авторскими свидетельствами и патентом.

Диссертация правильно отражает содержание опубликованных работ, а автореферат точно и полно – содержание диссертации.

Диссертационная работа Рылькова Владимира Васильевича удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, 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., член-корреспондент РАН,  
главный научный сотрудник,  
заведующий отделом ФИАН



Н.Н. Сибельдин  
18 августа 2015 г.

Подпись Н.Н. Сибельдина удостоверяю

Ученый секретарь ОФТТ ФИАН,  
кандидат физико-математических наук

О.М. Иваненко

**Сведения об оппоненте:**

**ФИО:** Сибельдин Николай Николаевич

**Ученая степень:** доктор физико-математических наук

**Специальность:** 01.04.10 - «Физика полупроводников и диэлектриков»

**Почтовый адрес:** 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53

**Телефон:** +7(499) 135-10-59

**Адрес электронной почты:** sibeldin@sci.lebedev.ru

**Наименование организации:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

**Должность:** Заведующий Отделом физики твердотельных наноструктур, главный научный сотрудник