

## УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор

"НПО "Орион"

член-корреспондент РАН

А.М. Филачёв

2015 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации 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"

### Актуальность темы

Работа В.В. Рылькова посвящена исследованию фотоэлектрических явлений в структурах на основе сильнолегированного слабокомпенсированного примесного кремния. Главным образом, изучены явления при уровнях легирования, при которых возникает прыжковая проводимость по основным состояниям примесей. Особенностью сильнолегированных слабокомпенсированных материалов является возникновение в них при низких температурах водородоподобных состояний, называемых  $D^-$  или  $A^+$  центрами, соответственно, у донорных и акцепторных центров, когда нейтральные донорные центры могут захватывать электроны, а нейтральные акцепторы – дырки. Эти центры формируют ещё одну примесную зону, по которой тоже могут двигаться носители заряда. Все эти явления могут целиком определять рекомбинационные характеристики материала и времена релаксации примесного фототока в структурах на основе таких материалов, то есть основные параметры таких примесных ИК-приёмников длинноволнового (до ~30 мкм) и дальнего (до ~ 200 мкм) ИК-диапазонов, как примесные фоторезисторы и приёмники с блокированной проводимостью по примесной зоне, которые ещё называют ВІВ-детекторами от английского Blocked Impurity Band detectors.

Эффект поля в примесной зоне также играет существенную роль при низких температурах и в работе кремниевых МОП-транзисторов со встроенным каналом проводимости, используемых в качестве входных каскадов в устройствах криоэлектроники.

Кроме того, что результаты исследований, выполненных в данной работе, представляют самостоятельную высокую научную ценность, они, к тому же, являются весьма актуальными для разработки фотоприёмных устройств длинноволнового ИК-диапазона для работы в условиях холодного космоса как для решения задач оборонного характера, так и для развития новых научных направлений, связанных с космосом, в частности, внеатмосферной инфракрасной астрономии. Как известно, в таких приёмниках возможна реализация предельных значений пороговой чувствительности, соответствующих космическим уровням фоновой облучённости, которые на 8-10 порядков ниже облучённости, создаваемой тепловым излучением Земли.

### **Новые научные результаты диссертационной работы, полученные лично автором**

Важной, на наш взгляд, особенностью диссертационной работы является исследование механизмов фотопроводимости в кремниевых структурах с малой компенсацией в экстремальных условиях: 1) в слабых электрических полях в отсутствие разогрева электронов проводимости; 2) в сильных квантующих магнитных полях, а также 3) при низких температурах в режиме ограничения фотоотклика структур прыжковой проводимостью. Именно в этих условиях в работе был обнаружен необычный монополярный фотовольтаический эффект в ВІВ-структурах, обусловленный быстрым остыванием фотоносителей в активной области объектов и особенностями их энергетической структуры, а также выявлен эффект Френкеля-Пула в примесной зоне активной области ВІВ-структур.

Относительно слабое влияние магнитного поля на фотоотклик Si:B ВІВ-структур, выявленное в ходе работы над диссертацией, 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 был обнаружен эффект гигантской модуляции интенсивности излучения ККЛ магнитным полем, обусловленный формированием "фононного горла" в электронной системе на основе 0D сильно вырожденных состояний в условиях квантования Ландау.

При исследовании транзисторных МОП-структур на основе слоёв легированного слабокомпенсированного кремния впервые был обнаружен квази-2D канал прыжковой проводимости, который формируется в области пересечения уровня Ферми с примесной зоной. В условиях формирования квази-2D канала были выявлены мезоскопические флуктуации недиагональной (холловской) компоненты тензора сопротивления  $R_{xy}$ , которые наблюдались в объектах с размерами, существенно превышающими размер ячейки

перколяционного кластера. Флуктуации  $R_{xy}$  по природе своей отличаются от флуктуаций продольного сопротивления  $R_{xx}$  тем, что определяются перестройкой бесконечного кластера, что, как показано в работе, дает возможность экспериментальной оценки важного параметра перколяционной системы – радиуса корреляции  $L_c$ .

В работе установлено также, что мезоскопические флуктуации поперечного сопротивления  $R_{xy}$  имеют общий характер и могут существенным образом проявляться не только при исследовании перколяционных систем в условиях эффекта поля, но и в других случаях, когда в результате внешнего воздействия происходит перестройка путей протекания. В частности, в системах с отрицательным гигантским магнетосопротивлением - магнитных металл-диэлектрических нанокомпозитах и полупроводниках, легированных магнитными примесями, которые перспективны для создания устройств спинтроники. Изучение этих флуктуаций в диссертационной работе позволило получить важную информацию не только о масштабах магнито-электрических неоднородностей, но и об эффекте Холла, который демонстрирует необычное поведение в режиме перколяционной проводимости.

Среди новых результатов работы отметим еще несколько, на наш взгляд, наиболее важных:

1. Впервые на примере легированного слабокомпенсированного Si:B ( $K \leq 10^{-3}$ ) изучено поведение коэффициента захвата дырок на нейтральные акцепторы в греющих электрических полях. Установлено, что в греющих полях коэффициент захвата увеличивается с ростом энергии дырок до энергий  $\bar{\varepsilon}_k \approx \varepsilon_i = 2$  мэВ (энергия связи дырки в изолированном  $A^+$ -центре), а при  $\bar{\varepsilon}_k \geq 2\varepsilon_i$  падает степенным образом вследствие уменьшения коэффициента захвата дырок на нейтральные центры. Результаты эксперимента подтверждаются вариационными расчетами, учитывающими конечный размер потенциала нейтрального центра и коротковолновый характер электрон-фононного взаимодействия.
2. Установлено, что при относительно высоких температурах ( $\approx 18$  К), когда непрямой канал рекомбинации зонного типа несущественен, коэффициент захвата дырок на отрицательно заряженные акцепторы ( $A^-$ -центры)  $\alpha^-$  линейно возрастает с увеличением уровня легирования. Предложена модель, в рамках которой рост  $\alpha^-$  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.
3. В Si:B ВВ-структурах с уровнем легирования активного слоя ( $N_A \approx 10^{18}$  см<sup>-3</sup>) обнаружен новый механизм приповерхностной фототермополевой ионизации примесей, имеющий линейчатый характер и позволяющий идентифицировать природу примеси в переходной  $i$ -Si/ $p$ -Si области ВВ-структур.

4. На примере Si:B МОП-структур ( $N_A = 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) установлено, что зависимость проводимости квази-2D канала  $\sigma$  от продольного электрического поля имеет пороговый характер и, начиная с некоторого поля, подчиняется закону:  $\ln \sigma(E) \propto E^{1/2}$ , в соответствие с представлениями о неомических свойствах неупорядоченных систем со случайным кулоновским потенциалом.

5. Обнаружено, что эффект Холла в магнитных двухкомпонентных системах вблизи порога протекания демонстрирует необычное поведение, в частности: 1) минимум в концентрационной зависимости тангенса холловского угла, наблюдаемый в  $\text{Fe}_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$  нанокompозитах на диэлектрической стороне перколяционного перехода и 2) превышение аномального эффекта Холла (АЭХ) в парамагнитной области температур над ферромагнитным АЭХ, обнаруженное в слоях  $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  ( $x \approx 0.1$ ).

### **Практическая значимость работы и область применения**

Результаты, полученные в работе, в первую очередь, могут быть практически использованы в организациях, занимающихся разработкой матричных фотоприёмных устройств длинноволнового и дальнего ИК-диапазонов на основе примесных фоторезисторов и структур с блокированной прыжковой проводимостью (ОАО "НПО "Орион", ОАО "НПП "Пульсар" и др.), а также кремниевых МОП-транзисторов со встроенным каналом проводимости, используемых в качестве входных каскадов в устройствах криоэлектроники.

Результаты работы были использованы для разработки компактного спектрометра на основе квантового каскадного лазера, который обладает достаточной мощностью излучения ( $\sim 10$  мВт) и стабильностью для осуществления исследований циклотронного резонанса (ЦР) в сильных (до 60 Тл) импульсных магнитных полях (точность измерений циклотронного поглощения по положению максимума ЦР лучше 1%, а по абсолютной его величине не хуже 10%).

В результате изучения обнаруженных мезоскопических флуктуаций развит 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.

### **Достоверность и обоснованность основных положений диссертации**

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается воспроизводимостью данных на большом числе объектов исследования. О надёжности 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.

### **Общая оценка диссертационной работы**

Работа В.В. Рылькова представляет собой достаточно обширное и законченное научное исследование фотоэлектрических и транспортных свойств кремниевых структур, актуальных для практических применений, в которых важную роль играет прыжковая проводимость и эффект поля в примесной зоне. Некоторые обнаруженные в работе явления носят общий характер. В частности, явление "мезоскопического" эффекта Холла, обнаруженное в Si:B МОП-структурах в режиме перколяционной (прыжковой) проводимости, наблюдается в других перколяционных системах, например, с гигантским магнетосопротивлением, в которых в результате действия магнитного поля происходит перестройка путей протекания.

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

Большое количество статей (всего В.В. Рыльковым опубликовано около 100 статей) в высоко рейтинговых отечественных и зарубежных журналах дают основание утверждать, что Рыльков Владимир Васильевич 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 неупорядоченных со сложным перколяционным характером проводимости. 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 публикации в сборниках трудов международных конференций, 2 авторских свидетельства и 1 патент РФ.

### **Замечания к работе**

1. В работе показана возможность использования Si:B ВІВ-структур для регистрации ИК-излучения в фотовольтаическом режиме, однако не приведены достигаемые параметры, например, фоточувствительность такого детектора.
2. На стр. 88 приведена длина волны отсечки  $\lambda_c = 21,5$  мкм для фотопроводника Si:Ga, оцененная из зависимости фототока от температуры имитатора излучения абсолютно черного тела. Эта величина  $\lambda_c$  соответствует энергии ионизации Ga  $\varepsilon_i \approx 58$  мэВ, что заметно меньше  $\varepsilon_i = 72$  мэВ, полученной из измерений спектров оптического поглощения. Причины этого не обсуждаются.

3. Описание результатов по исследованию транспортных свойств систем с гигантским отрицательным магнетосопротивлением (глава 5), которое доказывает общность обнаруженных в Si:B МОП-структурах мезоскопических флуктуаций эффекта Холла, представляется чересчур подробным.

Указанные замечания не снижают нашей общей высокой оценки диссертационной работы.

### Выводы

Диссертация В.В. Рылькова является законченной научно-квалификационной работой, в которой впервые детально исследованы механизмы электронного переноса в кремниевых структурах с малой компенсацией в условиях эффекта поля в примесной зоне и монополярном (примесном) фотовозбуждении, что является крупным научным достижением, вносящим важный вклад в развитие страны. Новизна и достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Защищаемые автором научные результаты опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах, докладывались на российских и международных конференциях.

Представленная работа удовлетворяет требованиям к докторским диссертациям в части п.п. 9, 10, 11, 13, 14 "Положения о присуждении учёных степеней", утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а её автор Рыльков Владимир Васильевич заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук.

Диссертация соответствует специальности 01.04.10 - «Физика полупроводников» (физико-математические науки).

Отзыв обсуждён и принят на заседании НТС ГНЦ РФ ОАО "НПО "Орион", протокол №4 от "01" июля 2015г.

Заместитель генерального директора ОАО "НПО "Орион"

по инновациям и науке,

доктор технических наук, профессор

  
И.Д. Бурлаков

Специальность 05.11.07 – "Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы,"<sup>1</sup>

Адрес электронной почты: orion@orion-ir.ru

Ведущий научный сотрудник

Научно-исследовательского центра ОАО "НПО "Орион",

доктор физико-математических наук, доцент

Специальность 01.04.10 – "Физика полупроводников",

Адрес электронной почты: orion@orion-ir.ru

  
Н.Б. Залетаев

## Сведения о ведущей организации

Открытое акционерное общество "НПО "Орион" (ОАО "НПО "Орион")  
Государственный Научный Центр Российской Федерации,  
Входит в холдинговую структуру АО "Швабе"  
Госкорпорации "Ростех"

Российская Федерация, 111123, г. Москва,  
Шоссе Энтузиастов, д.46/2

телефон: (499) 374-49-00

факс: (499) 373-68-62

e-mail: [orion@orion-ir.ru](mailto:orion@orion-ir.ru)

[www.orion-ir.ru](http://www.orion-ir.ru)

Генеральный директор



А.М. Филачёв