



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

"УТВЕРЖДАЮ"

Проректор по научной работе
ФГАОУ ВО "СПбПУ"

_____ О.Н. Остапенко

24 сентября 2015

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о диссертационной работе **Мальша Виталия Александровича** «Высокочастотный транспорт в квантово-размерных системах на основе германия и кремния. Бесконтактные методы исследования», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

1. Актуальность темы

Системы пониженной размерности в настоящее время являются наиболее изучаемыми объектами в физике полупроводников. Это связано с их уникальными свойствами, которые не наблюдаются в трехмерных объектах, что интересно и с точки зрения фундаментальной науки о полупроводниках, и с точки зрения технических применений.

Наиболее перспективными являются низко-размерные полупроводниковые системы на основе Si и Ge. Значительная разница в значениях параметров кристаллических решеток Si и Ge, достигающая до 4%, приводит к тому, что выращенные на подложке слои SiGe и Ge всегда будут напряженными. Поскольку в этих материалах с дырочным типом проводимости валентная зона имеет сложную структуру с вырожденными состояниями легких и тяжелых дырок, то из-за возникшего напряжения это вырождение снимается, и в зависимости от типа напряжений (деформации сжатия или растяжения) появляется возможность изучения свойств легких и тяжелых дырок по отдельности.

Системы на основе этих материалов нашли ряд интересных применений, например, при создании высокочастотных транзисторов и инфракрасных фотодетекторов.

Применение структур на основе Si и Ge для создания новых полупроводниковых устройств требует глубокого понимания их фундаментальных свойств. Для этого необходимо изучать зависимости проводимости носителей тока от магнитного поля, температуры, частоты электрического поля, что дает возможность определить, например, механизмы проводимости носителей заряда в разных температурных интервалах. С этой целью используются разнообразные методики исследования, включая те, которые позволяют проводить измерения проводимости без использования электрических контактов. Примерами таких бесконтактных методик являются акустическая и микроволновая методики.

Из вышесказанного следует, что изучение транспорта в низко-размерных системах на основе материалов Si и Ge без использования электрических контактов является актуальной задачей современной физики полупроводников.

Автор диссертации поставил своей задачей экспериментально определить параметры образца с напряженной квантовой ямой Ge в структуре p-GeSi/Ge/GeSi бесконтактными методами, такие как концентрация носителей заряда, подвижность, эффективная масса, импульсное и квантовое времена релаксации, а также механизм высокочастотной проводимости при низких температурах и сильных магнитных полях. При исследовании образцов с плотным массивом самоорганизующихся квантовых точек (КТ) Ge в Si была поставлена задача исследовать особенности механизмов низкотемпературной проводимости в этих объектах.

2. Методы и объекты исследования

Для успешного решения задач, поставленных в диссертации, использовались бесконтактные акустическая и микроволновая методики.

Объекты исследования представляют собой многослойные структуры, при измерении транспорта в которых на постоянном токе требуется создание электрических контактов, что часто вызывает технологические трудности. Бесконтактные методики, используемые в диссертации, лишены этого недостатка.

Акустическая методика основана на взаимодействии носителей заряда с переменным электрическим полем поверхностной акустической волны (ПАВ), распространяющейся по поверхности пьезоэлектрической подложки LiNbO₃, к

которой прижат исследуемый образец. При этом одновременное измерение коэффициента поглощения ПАВ и изменения ее скорости в магнитном поле позволяет определить реальную и мнимую компоненты ВЧ проводимости в диапазоне частот 30-400 МГц.

Для определения ВЧ проводимости при более высоких частотах автор диссертации использовал микроволновую методику. Она основана на взаимодействии носителей заряда с электрическим полем квази-ТЕМ-волны, проходящей по копланарному волноводу, сформированному в форме меандра на поверхности подложки изолирующего GaAs, к которой прижат исследуемый образец. Аналогично акустической методике, в микроволновой методике электрическое поле квази-ТЕМ-волны также вводится в исследуемый образец бесконтактным способом. Измерение изменений амплитуды и фазы квази-ТЕМ-волны в магнитном поле, перпендикулярном плоскости образца, позволяет определить реальную и мнимую компоненты ВЧ проводимости в частотном диапазоне 100-1500 МГц. Следует заметить, что измерения проводились в области низких температур $T < 4.2$ К до 18 Т.

3. Основные научные результаты и их новизна

При изучении зависимостей высокочастотной проводимости (ВЧ) от магнитного поля и температуры в структуре p-SiGe/Ge/SiGe в области гелиевых температур было показано, что в магнитных полях, в которых осуществляются осцилляции Шубникова–де Гааза, носители заряда (дырки) делокализованы, и ВЧ проводимость совпадает с проводимостью, измеренной на постоянном токе. Этот факт и позволяет определять основные характеристики дырочного газа. Что касается ВЧ проводимости в минимумах осцилляций в режиме целочисленного квантового эффекта Холла, то механизм ВЧ проводимости носит прыжковый характер и может быть описан с помощью двухузельной модели.

При измерениях ВЧ проводимости в наклонном магнитном поле была выявлена зависимость поперечной компоненты g-фактора и циклотронной массы тяжелых дырок от продольной компоненты магнитного поля.

Использование акустической и микроволновой методик позволило определить частотную зависимость ВЧ проводимости тяжелых дырок в диапазоне

частот 30-1500 МГц при $T=(1.6-4.2)$ К и магнитных полях до 8 Т, что помогло объяснить характер прыжковой проводимости в этом объекте.

В образцах с плотным массивом самоорганизующихся квантовых точек Ge в Si при $T=(1.6-4.2)$ К и магнитных полях до 8 Т наблюдалась (в линейном и нелинейном режимах) ВЧ прыжковая проводимость, определяемая переходами дырок между двумя и более соседними КТ, которые можно объединить в отдельные кластеры, не связанные между собой.

Все результаты, полученные в диссертации, являются новыми.

4. Достоверность и надежность результатов

Основные выводы диссертации обоснованы. Большое внимание в работе уделено анализу наблюдаемых эффектов на основе имеющихся теоретических представлений.

5. Научная и практическая ценность работы

Научная ценность работы В.А. Малыша состоит в развитии направления, изучающего взаимодействие поверхностной акустической волны, а также микроволнового электрического поля с носителями заряда в 2-мерных системах, позволяющее исследовать новые физические явления в квантово-размерных объектах, такие как особенности ВЧ прыжковой проводимости в системе квантовых точек, зависимости g -фактора и циклотронной массы тяжелых дырок от продольной компоненты магнитного поля.

Практическая ценность работы заключается в том, что в ней развиты бесконтактные методы определения параметров дырочного газа и низкотемпературных механизмов ВЧ проводимости в области локализации носителей заряда.

Разработан способ вычисления абсолютной величины реальной компоненты ВЧ проводимости дырок из микроволновых измерений путем сопоставления результатов микроволновой и акустической методик.

Результаты, полученные автором диссертации, можно рекомендовать для использования в группах, занимающихся изучением свойств низко-размерных

объектов: в Институте физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород), Физико-Техническом Институте им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург), Институте Физики Полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (г. Новосибирск), Институте Физики Металлов УО РАН (г. Екатеринбург).

6. Замечания по содержанию диссертации

Неясно, почему при сравнении с теорией экспериментальных величин коэффициентов, определяющих зависимость эффективной массы и g -фактора от параллельного магнитного поля в структуре p -GeSi/Ge/GeSi, оказалось, что хорошее согласие достигается при ширине квантовой ямы 10 нм, тогда как в схеме строения этой структуры фигурирует ширина ямы 20 нм.

Кроме того, следовало бы подробнее описать энергетическую диаграмму квантовых точек Ge в Si, в частности, пояснить природу расщепления уровней основного и первого возбужденного состояний.

Указанные замечания не являются принципиальными и не меняют общую высокую оценку диссертации.

7. Общая оценка диссертации

Диссертационная работа В.А. Малыша является завершенным научным исследованием. Основные результаты диссертации, связанные с изучением транспорта в низко-размерных системах на основе германия и кремния, являются новыми и важными. Оценивая диссертацию в целом, необходимо отметить высокий научно-методический уровень её выполнения. Автор является высококвалифицированным физиком-экспериментатором. Работа прошла апробацию на Международных и Российских конференциях. Основные результаты работы опубликованы в 15 статьях, докладах и тезисах. Автореферат правильно и достаточно полно отражает результаты и выводы диссертации.

По объему и научному уровню выполненных исследований, новизне и обоснованности положений и выводов, их научной и практической значимости диссертационная работа В.А. Малыша «Высокочастотный транспорт в квантово-размерных системах на основе германия и кремния. Бесконтактные методы

исследования», полностью отвечает требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Автор диссертации Малыш Виталий Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Отзыв составил:

Профессор кафедры физики
полупроводников и наноэлектроники
ФГАОУ ВО "СПбПУ", доктор
физико-математических наук

Воробьев Леонид Евгеньевич

Адрес: ул. Политехническая 29,
Санкт-Петербург, 195251
Телефон: +7 812 552 9671
E-mail: Lvor@rphf.spbstu.ru

Работа заслушана и обсуждена 10 сентября 2015 г. на научном семинаре кафедры физики полупроводников и наноэлектроники СПбПУ.

Отзыв утвержден на заседании кафедры физики полупроводников и наноэлектроники СПбПУ 24 сентября 2015 г. (протокол № 1).

Заведующий кафедрой физики
полупроводников и наноэлектроники
ФГАОУ ВО "СПбПУ", доктор
физико-математических наук

Фирсов Дмитрий Анатольевич

Адрес: ул. Политехническая 29,
Санкт-Петербург, 195251
Телефон: +7 812 552 9671
E-mail: dmfir@rphf.spbstu.ru