

Малыш Виталий Александрович

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ТРАНСПОРТ В КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ
СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ГЕРМАНИЯ И КРЕМНИЯ. БЕСКОНТАКТНЫЕ
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

специальность

01.04.10 – физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

- Научный руководитель: **Дричко Ирина Львовна**
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН
- Официальные оппоненты: **Девятов Эдуард Валентинович**
доктор физико-математических наук,
доцент ИФТТ РАН
- Аронзон Борис Аронович**
доктор физико-математических наук,
начальник лаборатории магнитонаноэлектроники в
Национальном Исследовательском Центре «Курчатовский
институт»
- Ведущая организация: Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра
Великого (СПбПУ)

Защита диссертации состоится «15» октября 2015 г. в _____ на заседании
диссертационного совета Д.002.205.02 при Физико-техническом институте им. А.Ф.
Иоффе РАН по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института
им. А.Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н.

Л.М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Полупроводниковые системы пониженной размерности (квантово-размерные системы) являются в настоящее время одними из самых важных и востребованных объектов исследования в физике полупроводников. Это обусловлено рядом их уникальных свойств, которые не наблюдаются в обычных трехмерных структурах. Приложение внешнего магнитного поля перпендикулярно плоскости квантовой ямы приводит к тому, что энергетический спектр носителей заряда становится полностью дискретным. Квантование энергии носителей заряда и изменение их волновой функции в сильных магнитных полях обеспечивают появление новых квантовых явлений, среди которых особое место занимает целочисленный квантовый эффект Холла (ЦКЭХ).

В последнее время перспективными выглядят низкоразмерные полупроводниковые системы на основе Si и Ge. Несмотря на значительную разницу в значениях параметров кристаллических решеток Si и Ge, достигающей до 4% и приводящей к тому, что выращенные на подложке слои всегда будут напряженными, системы на основе данных материалов нашли ряд интересных применений для создания высокочастотных транзисторов и инфракрасных фотодетекторов [1]. Такие системы интересны тем, что они имеют сложную структуру валентной зоны с вырожденными состояниями подзон легких и тяжелых дырок. Вследствие механических напряжений это вырождение снимается, и в зависимости от типа механических напряжений (деформации сжатия или растяжения) появляется возможность изучения свойств легких и тяжелых дырок по отдельности.

Применение структур на основе Si и Ge для создания новых полупроводниковых устройств требует глубокого понимания их фундаментальных свойств. Одной из важных характеристик низкоразмерных систем является реализуемый в них механизм проводимости носителей заряда. Получить информацию о нем можно, изучая зависимости проводимости носителей заряда от магнитного поля, частоты и температуры. С этой целью используются разнообразные методики исследования, включая те, которые позволяют проводить измерения проводимости без использования электрических контактов. Примерами таких бесконтактных методик являются акустическая методика и микроволновая методика, которые были впервые успешно применены в работах [2] и [3] соответственно для изучения проводимости в двумерных системах GaAs/AlGaAs.

Таким образом, изучение проводимости носителей заряда в низкоразмерных системах на основе материалов Si и Ge является весьма актуальной задачей современной физики полупроводников. При этом важно проводить измерения проводимости бесконтактными способами.

Цель данной работы заключалась в изучении транспортных свойств и механизмов низкотемпературной проводимости носителей заряда в низкоразмерных структурах на основе Si и Ge с помощью бесконтактных акустической и микроволновой методик. Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1) для структуры p-SiGe/Ge/SiGe:

- измерить высокочастотную (ВЧ) проводимость тяжелых дырок при температурах 0,3-5,8 К и частотах 30-300 МГц в магнитных полях до 18 Тл с помощью акустической методики;

- определить основные параметры двумерного дырочного газа бесконтактной акустической методикой в области магнитных полей, соответствующих эффекту Шубникова-де Гааза;

- определить механизм ВЧ проводимости в области магнитных полей, соответствующих ЦКЭХ;

- измерить ВЧ проводимость тяжелых дырок при температуре 0,3 К и частоте 30 МГц в наклонных магнитных полях в диапазоне углов наклона 0° - 83° (угол наклона отсчитывается от нормали к плоскости двумерного слоя);

- определить величину g-фактора и оценить влияние продольной компоненты магнитного поля на величину g-фактора и циклотронной массы тяжелых дырок;

- расширить диапазон рабочих частот до 1500 МГц с помощью микроволновой методики;

- разработать способ определения абсолютного значения реальной компоненты ВЧ проводимости тяжелых дырок с помощью микроволновой методики;

2) для образцов с плотным массивом самоорганизующихся квантовых точек (КТ) Ge в Si:

- используя акустическую методику, измерить ВЧ проводимость дырок в области температур 1,8-13 К и диапазоне частот 30-414 МГц в магнитных полях до 8 Тл при разных интенсивностях поверхностной акустической волны (ПАВ);

- определить механизм нелинейности ВЧ проводимости дырок в переменном электрическом поле ПАВ.

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что впервые:

1. Для структуры p-SiGe/Ge/SiGe:

1.1. - показано, что в минимумах осцилляций ВЧ проводимости в режиме ЦКЭХ при $T < 1,6$ К механизм проводимости носит прыжковый характер и может быть описан с помощью двухузельной модели;

1.2. - определены величины поперечной и продольной компонент g -фактора тяжелых дырок: $|g_{\perp}| \approx 6,9$ и $g_{\parallel} = 0$;

1.3. - получена зависимость поперечной компоненты g -фактора и циклотронной массы тяжелых дырок от продольной компоненты магнитного поля;

1.4. - разработан способ определения абсолютного значения реальной компоненты ВЧ проводимости тяжелых дырок с помощью микроволновой методики;

1.5. - с помощью акустической и микроволновой методик была исследована ВЧ проводимость тяжелых дырок в диапазоне частот 30-1500 МГц;

2. для образцов с плотным массивом самоорганизующихся КТ Ge в Si:

2.1. - показано, что в линейном и нелинейном режимах реализуется ВЧ прыжковая проводимость, определяемая переходами дырок между двумя и более соседними КТ, которые можно объединить в отдельные кластеры, не связанные между собой, т.е. дырки не могут переходить из одного кластера в другой;

2.2. - определено, что механизм нелинейности ВЧ проводимости связан с разогревом дырок в переменном электрическом поле ПАВ.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. В напряженных структурах p-SiGe/Ge/SiGe в области делокализации носителей заряда (тяжелых дырок) в двумерном канале Ge проводимость на постоянном токе (σ_{xx}^{DC}) и высокочастотная проводимость ($\sigma_{xx}^{AC} = \sigma_1 - i\sigma_2$) соотносятся следующим образом: $\sigma_{xx}^{DC} = \sigma_1 \gg \sigma_2$. В области локализации носителей заряда в минимумах высокочастотной (ВЧ) проводимости, соответствующих режиму целочисленного квантового эффекта Холла, выполняется соотношение $\sigma_2 > \sigma_1 > \sigma_{xx}^{DC}$.

2. В напряженных структурах p-SiGe/Ge/SiGe в двумерном канале Ge в области локализации тяжелых дырок при малых числах заполнения ВЧ проводимость при низких температурах носит прыжковый характер и может быть описана в рамках двухузельной модели.

3. g -фактор и циклотронная масса тяжелых дырок в напряженном двумерном канале Ge зависят от угла наклона магнитного поля относительно нормали к плоскости двумерного слоя Ge.

4. В образцах с плотным массивом самоорганизующихся квантовых точек (КТ) Ge в Si механизм низкотемпературной проводимости носит прыжковый характер и может быть описан с помощью «кластерной» модели.

5. Нелинейные эффекты в ВЧ проводимости, наблюдаемые при взаимодействии ПАВ с плотным массивом КТ Ge в Si, связаны с разогревом дырок переменным электрическим полем ПАВ.

Научно-практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Предложен способ вычисления реальной и мнимой компонент ВЧ проводимости носителей заряда из зависимостей коэффициента поглощения и относительного изменения скорости ПАВ от магнитного поля.

2. Разработан способ определения зазора между исследуемым образцом и пьезоэлектрической подложкой, используемой в акустической методике.

3. Предложен способ определения основных параметров двумерного газа без использования электрических контактов.

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

Личный вклад соискателя в диссертационную работу состоял в непосредственном проведении измерений с помощью акустической и микроволновой методик, обработке экспериментальных результатов, а также участии в подготовке и написании статей.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих международных и Российских конференциях: Международная зимняя школа по физике полупроводников (Санкт-Петербург-Зеленогорск, 2011-2013), Российская молодежная конференция по физике и астрономии (Физика) (Санкт-Петербург, 2011-2012), XXXVI Собрание по физике низких температур (Санкт-Петербург, 2012), X Российская конференция по физике полупроводников (Нижний Новгород, 2011), XI Российская конференция по физике полупроводников (Санкт-Петербург, 2013), Нанозеллектроника и Нанозеллектроника (Труды XVII международного симпозиума, Нижний Новгород, 2013), 13th European Conference on Organized Films (Cork, Ireland, 2013), The 15th International Conference on Transport in Interacting Disordered Systems (TIDS 15) (Sant Feliu de Guíxols, Spain, 2013).

На конкурсе лучших работ Физико-Технического Института им. А.Ф. Иоффе РАН в 2013 году работа «Высокочастотный магнетотранспорт в структурах p-SiGe/Ge/SiGe с высокой подвижностью» была отмечена премией ФТИ, а работа «Бесконтактные измерения высокочастотной проводимости в структурах с квантовым эффектом Холла» получила премию Отделения Физики Диэлектриков и Полупроводников ФТИ в 2014 году.

Публикации: Основные результаты диссертационной работы были представлены в 15 публикациях, из которых 5 – это статьи [A1-A5], опубликованные в следующих реферируемых журналах: “Physical Review B”, “Journal of Applied Physics”, “Solid State Communications”, “AIP Conference Proceedings”.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 119 страниц. В диссертации содержится 65 рисунков, 2 таблицы. Список литературы состоит из 89 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи, указана научная новизна, изложены выносимые на защиту положения, упомянуто о личном вкладе соискателя и апробации результатов проделанной работы, а также представлено краткое описание структуры диссертации.

В главе 1 представлен обзор основных теоретических и экспериментальных результатов, относящихся к данной диссертационной работе.

В параграфе 1.1 приведены общие сведения о размерном квантовании энергетического спектра носителей заряда в низкоразмерных полупроводниковых структурах. В частности, рассмотрена ситуация, в которой электроны «заперты» в бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме.

В параграфе 1.2 обсуждается, как изменяется энергетический спектр электронов в двумерной (2D) системе в присутствии постоянного однородного магнитного поля, направленного вдоль нормали к плоскости квантовой ямы. Приведено решение уравнения Шредингера с учетом калибровки Ландау. Также указаны условия для экспериментального наблюдения квантования Ландау.

Параграф 1.3 посвящен целочисленному квантовому эффекту Холла (ЦКЭХ), который заключается в появлении плато или ступенек в зависимости холловского сопротивления (холловской проводимости) от напряженности поперечного магнитного поля, сопровождающихся глубокими минимумами в зависимости продольного сопротивления (продольной проводимости) от поперечного магнитного поля. Образование плато в ЦКЭХ объясняется существованием локализованных носителей заряда в «хвостах» плотности состояний на каждом уровне Ландау. Их появление связано с присутствием беспорядка в 2D-системе, обусловленного случайным распределением примесей и дефектов.

В параграфе 1.4 приводятся сведения об известных работах, посвященных экспериментальному изучению взаимодействия поверхностной акустической волны (ПАВ) с квантово-размерными системами.

В параграфе 1.5 обсуждаются известные работы, посвященные экспериментальному изучению высокочастотной проводимости носителей заряда в квантово-размерных системах с использованием копланарного волновода.

В параграфе 1.6 рассмотрена высокочастотная прыжковая проводимость, реализуемая в области локализации носителей заряда в минимумах случайного потенциала между соседними уровнями Ландау. Физическая природа прыжковой

проводимости на постоянном и переменном токе различна. Чтобы прыжковая проводимость на постоянном токе (σ_{xx}^{DC}) была возможна, необходимо существование цепи последовательных прыжков от одного электрического контакта к другому (т.е. наличие путей протекания через образец). Что касается прыжковой проводимости на переменном токе (σ_{xx}^{AC}), то она традиционно описывается в рамках так называемой двухузельной модели [4-6], согласно которой носители заряда совершают прыжки внутри пар локализованных состояний с близкими энергиями.

Во второй главе обсуждаются бесконтактные методики измерения ВЧ проводимости. Приведено описание экспериментальной установки и объектов исследования.

В параграфе 2.1 рассмотрена акустическая методика [2; 7], которая основана на взаимодействии носителей заряда с переменным электрическим полем ПАВ, распространяющейся по поверхности пьезоэлектрической подложки LiNbO_3 , к которой прижат исследуемый образец. Измерения проводятся в магнитном поле, перпендикулярном плоскости образца, в области гелиевых температур. Одновременное измерение коэффициента поглощения (Γ) ПАВ и изменения ее скорости ($\Delta V/V_0$) позволяет определить реальную (σ_1) и мнимую (σ_2) компоненты высокочастотной проводимости ($\sigma_{xx}^{AC} = \sigma_1 - i\sigma_2$) с помощью следующих уравнений [8]:

$$\Gamma = 8.68 \frac{K^2}{2} qA \frac{[4\pi\sigma_1 t(q)/\varepsilon_s v_0]}{[1 + 4\pi\sigma_2 t(q)/\varepsilon_s v_0]^2 + [4\pi\sigma_1 t(q)/\varepsilon_s v_0]^2},$$

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{K^2}{2} A \frac{[1 + 4\pi\sigma_2 t(q)/\varepsilon_s v_0]}{[1 + 4\pi\sigma_2 t(q)/\varepsilon_s v_0]^2 + [4\pi\sigma_1 t(q)/\varepsilon_s v_0]^2}, \quad (1)$$

$$A = 8b(q)(\varepsilon_1 + \varepsilon_0)\varepsilon_0^2 \varepsilon_s \exp[-2q(a + d)],$$

где K^2 - коэффициент электромеханической связи ниобата лития; q и V_0 - волновой вектор и скорость ПАВ в ниобате лития соответственно; a - зазор между пьезоэлектрической подложкой ниобата лития и образцом; d - глубина залегания проводящего канала (квантовой ямы), которая определяется технологами; ε_1 , ε_0 и ε_s - диэлектрические постоянные ниобата лития, вакуума и образца соответственно; b и t - сложные функции, зависящие от a , d , ε_1 , ε_0 и ε_s .

В параграфе 2.2 рассмотрена микроволновая методика [9; 10], которая 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 квази-ТЕМ-волны в магнитном поле позволяет определить реальную компоненту σ_{xx}^{AC} в образце с помощью соотношения [11]:

$$\operatorname{Re}(\sigma_{xx}^{AC}) = \sigma_1 = -\frac{w}{2Z_0 d} \ln P \sqrt{1 + \left(\frac{v_{ph}}{2d\omega} \ln P \right)^2}, \quad (2)$$

где Z_0 – характеристический импеданс копланарного волновода; d – длина сигнального провода («змейки») копланарного волновода; w – ширина щели между сигнальным проводом и земляным проводом; v_{ph} – фазовая скорость волны, проходящей через копланарный волновод; ω – частота волны; $P \sim |V_{in}/V_{out}|^2$ – относительная мощность волны на выходе копланарного волновода, V_{in} и V_{out} – амплитуда волны на входе и выходе соответственно.

В параграфе 2.3 представлена схема экспериментальной установки, используемой для проведения акустических и микроволновых измерений, в частности ее криогенная и измерительная части.

В параграфе 2.4 подробно обсуждаются объекты исследования: образец p-SiGe/Ge/SiGe и образцы с плотным массивом КТ Ge в Si. Приведены их строения, способы изготовления, а также зонные диаграммы.

Третья глава посвящена исследованию высокочастотной проводимости тяжелых дырок в образце p-SiGe/Ge/SiGe при температурах 0,3-5,8 К и частотах 30-300 МГц в поперечном магнитном поле до 18 Тл с помощью акустической методики.

В параграфе 3.1 приведены экспериментальные зависимости коэффициента поглощения (Γ) и относительного изменения скорости ПАВ ($\Delta V/V_0$) от магнитного поля (B) (см рис. 3а-б), которые демонстрируют богатую осцилляционную картину. Причина возникновения осцилляций в зависимостях $\Gamma(B)$ и $\Delta V(B)/V_0(0)$ объясняется следующим образом. Поскольку $\Gamma(B)$ и $\Delta V(B)/V_0(0)$ зависят от проводимости двумерного канала (как следует из уравнений (1)), то квантование энергетического спектра тяжелых дырок в сильном поперечном магнитном поле, приводящее к появлению осцилляций проводимости, также будет вызывать соответствующие осцилляции в поглощении и изменении скорости ПАВ.

Кроме того, как следует из рис. 3а-б, начиная с 3 Тл и выше, максимумы в зависимости $\Gamma(B)$ начинают расщепляться. Такое расщепление связано с релаксационным механизмом поглощения переменного электрического поля,

сопровождающего ПАВ, дырками в двумерном слое и может быть объяснено при условии $\sigma_2 = 0$. Если проводимость велика, т.е. $\Sigma_1 = 4\pi\sigma_1 t(q)/\varepsilon_s v_0 \gg 1$, то $\Gamma \sim 1/\sigma_1$; когда проводимость очень мала, т.е. $\Sigma_1 \ll 1$, то $\Gamma \sim \sigma_1$; если же $\Sigma_1 = 1$, то Γ имеет максимум, равный $\Gamma_{\max} = 8.68 \frac{K^2}{4} qA$.

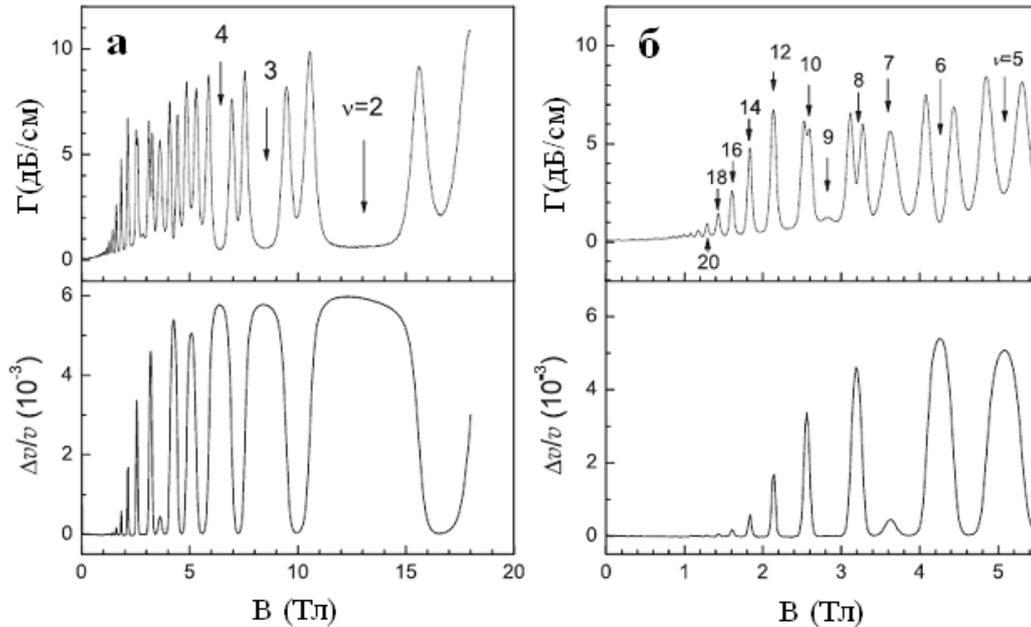


Рис. 1. Зависимости коэффициента поглощения ПАВ Γ и изменения ее скорости $\Delta V/V_0$ от магнитного поля B при частоте $f = 30$ МГц и температуре $T = 0,3$ К: (а) для магнитных полей до 18 Тл; (б) в диапазоне магнитных от 0 до 5.5 Тл. Стрелками обозначены числа заполнения.

В параграфе 3.2 показаны способы вычисления основных параметров двумерного дырочного газа из полученных экспериментальных данных, а именно: концентрации, подвижности и проводимости при нулевом магнитном поле, транспортного и квантового времен релаксации, температуры Дингла, эффективной массы. Кроме того, в этом параграфе обсуждается способ определения величины зазора a путем совмещения максимумов осцилляций в зависимостях $\sigma_1(B)$, полученных с помощью акустической методики при разных частотах. Показано, что найденные значения σ_1 в максимумах осцилляций проводимости совпадают с соответствующими максимумами осцилляций в зависимости $\sigma_{xx}^{DC}(B)$. Отсюда следует, что проводимость, определяемая делокализованными тяжелыми дырками, не зависит от частоты (в рассматриваемом частотном диапазоне). Величина зазора получилась равной $a \approx 0,6 \times 10^{-6}$ м.

В параграфе 3.3 показано, что механизм проводимости в области локализации тяжелых дырок носит прыжковый характер и может быть описан в рамках двухузельной модели. Такой вывод сделан на основании того, что при малых числах заполнения ($\nu = 2, 3, 4$) σ_1 начинает слабо зависеть от магнитного поля ($\sigma_1 \sim 1/B^2$; см рис. 2) и температуры, а также вследствие выполнения условия $\sigma_1 < \sigma_2$ (см рис. 3). В области делокализации, соответствующей максимумам осцилляций в зависимости $\sigma_1(B)$, выполняется обратное условие: $\sigma_1 > \sigma_2$.

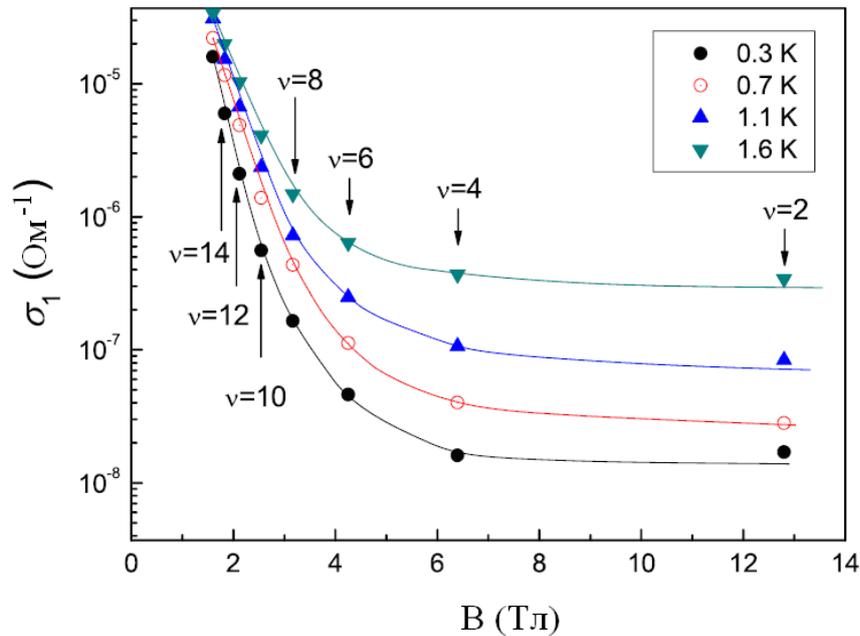


Рис. 2. Зависимость реальной компоненты σ_1 высокочастотной проводимости от магнитного поля B в минимумах осцилляций с числами заполнения $\nu = 2, 4, 6, 8, 10, 12$ и 14 при температурах $0.3, 0.7, 1.1$ и 1.6 К.

Четвертая глава посвящена изучению высокочастотной проводимости тяжелых дырок в образце p -SiGe/Ge/SiGe в наклонных магнитных полях с использованием акустической методики.

В параграфе 4.1 из анализа активационной проводимости при четных и нечетных числах заполнения в поперечном магнитном поле определена поперечная компонента g -фактора (g_{\perp}) с учетом уширения уровней Ландау. Получилось, что коэффициент уширения уровней Ландау $C \approx 0.69 \pm 0.03$ мэВ/Тл^{1/2} и $|g_{\perp}| \approx 6.9 \pm 0.6$.

В параграфе 4.2 рассмотрено влияние продольной компоненты магнитного поля на g_{\perp} – фактор и циклотронную массу m_c .

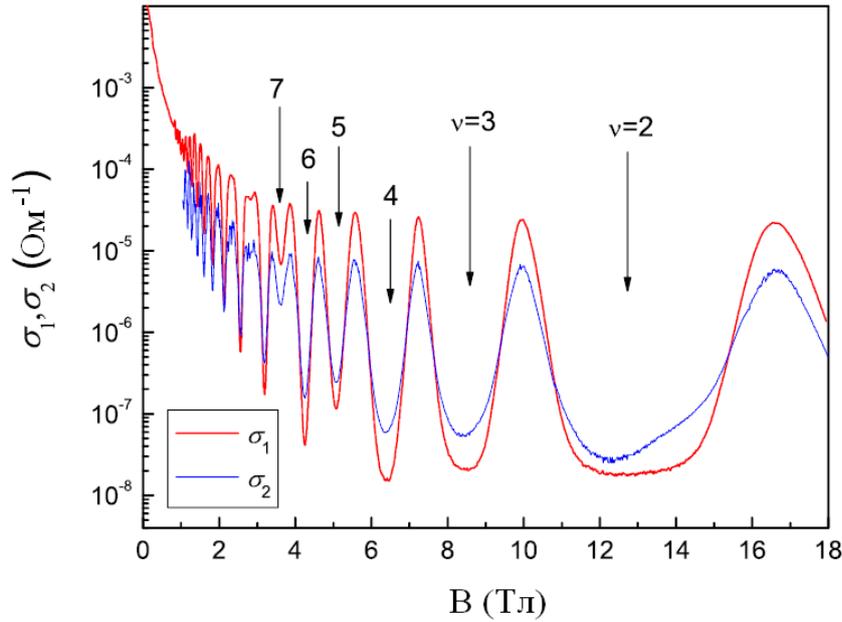


Рис. 3. Зависимости реальной σ_1 и мнимой σ_2 компонент высокочастотной проводимости от магнитного поля B при $T = 0,3$ К и $f = 30$ МГц.

Получена зависимость реальной компоненты σ_1 высокочастотной проводимости от поперечной компоненты магнитного поля $B_{\perp} = B_{TOT} \cos \Theta$ для разных углов наклона Θ (отсчитывается от нормали к плоскости двумерного слоя). Следует также отметить, что в чистом продольном магнитном поле никаких изменений коэффициента поглощения и скорости ПАВ не наблюдалось. Это говорит о том, что $g_{\parallel} = 0$ на потолке подзоны тяжелых дырок, и, таким образом, g -фактор тяжелых дырок является анизотропным. Для случая анизотропного g -фактора в наклонном магнитном поле амплитуды осцилляций проводимости не должны зависеть от угла наклона, т.е. они определяются только поперечной компонентой магнитного поля B_{\perp} .

Для малых чисел заполнения $\nu = 2, 3$ и 4 с увеличением угла наклона Θ до 60° положения минимумов осцилляций сдвигаются в сторону более высоких магнитных полей, при этом амплитуды осцилляций σ_1 практически не изменяются (см рис. 4а). Для каждого числа заполнения измерения, проводимые в магнитных полях до 18 Тл, ограничивались определенным углом наклона. В частности, для $\nu = 4$ угол наклона был ограничен значением 60° .

Казалось бы, полученные экспериментальные результаты подтверждают вывод о том, что для случая анизотропного g -фактора в наклонном магнитном поле амплитуды осцилляций проводимости не должны зависеть от угла наклона [12]. Однако, если рассмотреть амплитуды осцилляций проводимости при больших числах заполнения $\nu \geq 5$

(см рис. 4b), то можно увидеть, что они начинают уменьшаться при углах наклона больше 60° . Мы считаем, что независимость амплитуды осцилляций проводимости от угла наклона при числах заполнения $\nu = 2, 3$ и 4 связана с тем, что при указанных малых числах заполнения реализуется прыжковая проводимость, которая, как показано на рис. 2, слабо зависит от магнитного поля.

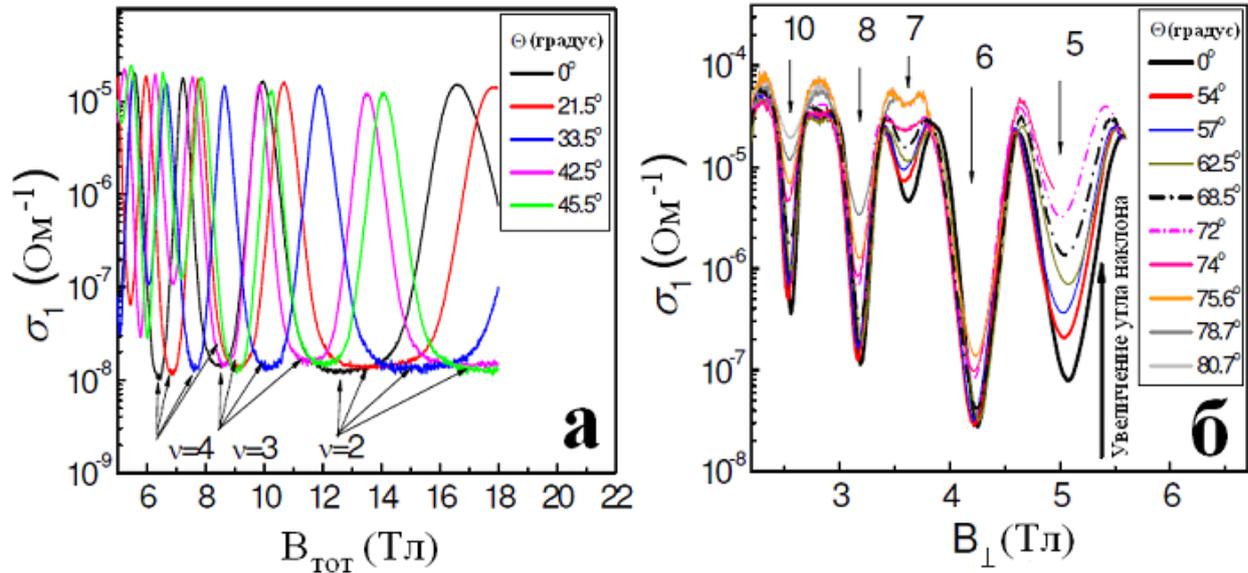


Рис. 4. (а) Зависимость реальной компоненты σ_1 высокочастотной проводимости от полного магнитного поля B_{TOT} для разных углов наклона Θ ; (б) Зависимость реальной компоненты σ_1 от поперечной компоненты магнитного поля $B_{\perp} = B_{TOT} \cos \Theta$ для углов наклона $\Theta = (0 \div 80)^\circ$; $f = 30$ МГц, $T = 0.3$ К. Стрелками обозначены числа заполнения.

Что касается больших чисел заполнения ($\nu \geq 5$), то увеличение проводимости в минимумах осцилляций с увеличением угла наклона Θ и уменьшение амплитуды осцилляций как для четных, так и для нечетных чисел заполнения в случае широкой квантовой ямы (порядка 200 \AA) связано с воздействием продольной компоненты магнитного поля на циклотронную массу m_c , g_{\perp} -фактор и коэффициент уширения уровней Ландау C в сложной валентной зоне Ge. Соответствующие вычисления были сделаны Л.Е. Голубом и С.А. Тарасенко [А4], результаты которых хорошо совпадают экспериментом.

Пятая глава посвящена изучению высокочастотной проводимости в образцах, содержащих плотные массивы самоорганизующихся квантовых точек (КТ) Ge в Si, при температурах 1,8-13 К и частотах 30-414 МГц в магнитных полях до 8 Тл с использованием акустической методики.

В параграфе 5.1 рассмотрены результаты измерений в линейном режиме, при котором коэффициент поглощения ПАВ не зависит от интенсивности ПАВ. Показано, что механизм высокочастотной проводимости носит прыжковый характер, который, однако, нельзя описать в рамках двухузельной модели, поскольку не выполняется условие $\sigma_1 \ll \sigma_2$.

На основании численного моделирования, выполненного Ю.М. Гальпериним и Й. Бергли [A1], было сделано предположение, что прыжковая проводимость в данном случае определяется переходами дырок между двумя и более соседними КТ, которые можно объединить в кластер (см рис. 5). При этом разные кластеры не «сообщаются» между собой, т.е. дырки не могут переходить из одного кластера в другой.

**2D-слой с плотным массивом узлов
или квантовых точек**

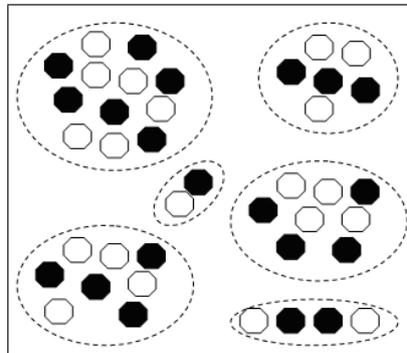


Рис. 5. Схематическое представление «кластерной» модели, в соответствии с которой высокочастотная проводимость носителей заряда в системе с плотным массивом узлов или квантовых точек определяется переходами носителей заряда между близкорасположенными узлами или квантовыми точками, составляющими кластеры произвольной формы (обозначены пунктирными линиями). Занятые узлы в пределах каждого кластера показаны в виде черных кружков, а свободные – в виде белых кружков.

В параграфе 5.2 рассмотрены результаты измерений коэффициента поглощения ПАВ в нелинейном режиме. В частности, показано, что в нелинейном режиме происходит разогрев дырок переменным электрическим полем ПАВ, механизм которого обусловлен рассеянием дырок на деформационном потенциале акустических фононов в условиях сильного экранирования.

В шестой главе исследована проводимость тяжелых дырок в образце p-SiGe/Ge/SiGe в широком диапазоне частот (100-1500 МГц) при температурах 1,7-4,2 К в магнитных полях до 8 Тл с использованием микроволновой методики.

В параграфе 6.1 приведены результаты измерения амплитуды сигнала на выходе копланарного волновода от магнитного поля в присутствии образца, а также разработан способ вычисления абсолютного значения реальной компоненты высокочастотной проводимости путем сопоставления результатов акустических и микроволновых измерений.

В параграфе 6.2 проведен анализ зависимости реальной компоненты σ_1 высокочастотной проводимости от частоты, полученной с помощью разработанного способа, в минимуме осцилляции с числом заполнения $\nu = 4$, который позволил сделать вывод о механизме проводимости в области локализации тяжелых дырок (см рис. б). Обнаружено, что при частотах $f \geq 100$ МГц проводимость $\sigma_1 \sim fT^0$ и, поэтому, может быть описана в рамках двухузельной модели. При частотах $f \leq 100$ МГц зависимость $\sigma_1(f)$ начинает выполаживаться, свидетельствуя о том, что механизм проводимости начинает меняться, и двухузельная модель перестает работать (поскольку $\sigma_1(f) \rightarrow \sigma_{xx}^{DC}$). Это объясняется тем, что в этой области частот в проводимости определяющую роль начинают играть переходы тяжелых дырок внутри кластеров, которые состоят из близкорасположенных минимумов крупномасштабного потенциала, сформированного между уровнями Ландау.

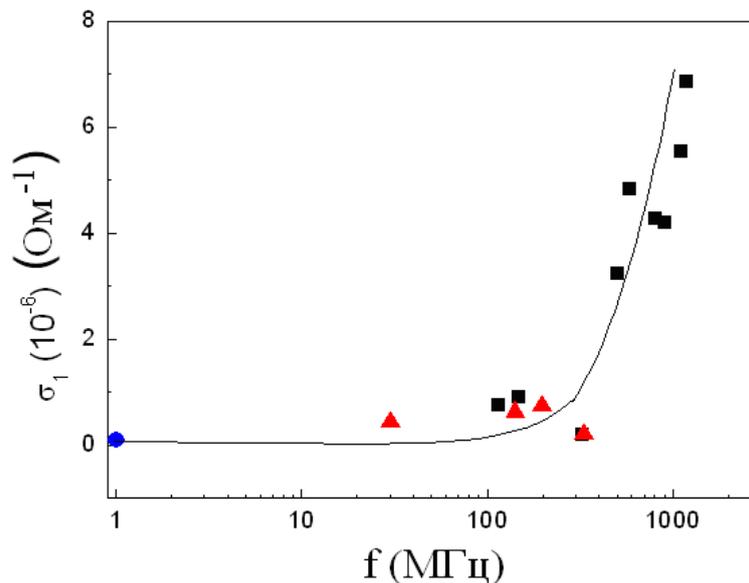


Рис. 6. Зависимость реальной компоненты σ_1 высокочастотной проводимости от частоты f в минимуме осцилляции с числом заполнения $\nu = 4$ при $T = 1,7$ К. Значение статической проводимости σ_{xx}^{DC} показано «кружком». Значения, полученные с помощью акустической методики, обозначены «треугольниками». Значения, полученные с помощью микроволновой методики, показаны в виде «квадратов».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Показано, что для структуры p-SiGe/Ge/SiGe высокочастотная проводимость ($\sigma_{xx}^{AC} = \sigma_1 - i\sigma_2$) делокализованных тяжелых дырок не зависит от частоты в соответствии с формулой Друде (при выполнении условия $\omega\tau_0 \ll 1$, где τ_0 - транспортное время релаксации, ω - частота поверхностной акустической волны в случае акустической методики или квази-ТЕМ-волны в случае микроволновой методики). Этот результат был использован для определения величины зазора между пьезоэлектрической подложкой и образцом, который необходим для вычисления σ_{xx}^{AC} с помощью акустической методики, а также для определения поправочного коэффициента, применяемого для вычисления σ_{xx}^{AC} с помощью микроволновой методики.

2. В области магнитных полей, соответствующих минимумам осцилляций ВЧ проводимости в режиме целочисленного квантового эффекта Холла, механизм проводимости тяжелых дырок носит прыжковый характер, и при этом выполняется неравенство: $\sigma_{xx}^{DC} < \sigma_1 < \sigma_2$. Физическая природа прыжковой проводимости на постоянном и переменном токах различна. Для прыжковой проводимости на постоянном токе (σ_{xx}^{DC}) необходимо существование цепи последовательных прыжков от одного электрического контакта к другому. Для описания прыжковой проводимости на переменном токе (σ_{xx}^{AC}) справедлива двухузельная модель, согласно которой носители заряда совершают прыжки внутри пар локализованных состояний с близкими энергиями.

3. g-фактор и циклотронная масса тяжелых дырок в напряженном двумерном слое Ge зависят от угла наклона магнитного поля для чисел заполнения уровней Ландау $\nu > 5$. Этот эффект определяется ростом продольной компоненты магнитного поля в широкой квантовой яме (порядка 200 Å).

4. Разработан способ определения абсолютного значения реальной компоненты ВЧ проводимости σ_1 с помощью микроволновой методики путем сопоставления результатов микроволновых и акустических измерений. Способ был применен для исследования низкотемпературного механизма проводимости тяжелых дырок в широком диапазоне частот 30-1500 МГц. Обнаружено, что при высоких частотах $f \geq 100$ МГц проводимость $\sigma_1 \sim fT^0$ и может быть описана в рамках двухузельной модели. При меньших частотах $f \leq 100$ МГц двухузельная модель неприменима, и проводимость может быть объяснена прыжками тяжелых дырок внутри кластеров, составленных из близкорасположенных минимумов крупномасштабного потенциала между уровнями Ландау.

5. В образцах, содержащих плотные массивы квантовых точек (КТ) Ge в Si, механизм низкотемпературной ВЧ проводимости дырок носит прыжковый характер и определяется переходами дырок между двумя и более соседними КТ, которые можно объединить в кластер. При этом нелинейные эффекты в ВЧ проводимости, наблюдаемые при взаимодействии ПАВ с системой КТ, связаны с разогревом дырок переменным электрическим полем ПАВ.

Таким образом, в данной работе наблюдались разные низкотемпературные механизмы прыжковой проводимости в условиях локализации носителей заряда. В частности, в образце p-SiGe/Ge/SiGe при частоте 30 МГц и температурах 0,7-1,6 К реализуется двухузельная модель. На том же образце при частотах 30-1500 МГц и температурах 1,7-4,2 К механизм проводимости меняется: при частотах $f \geq 100$ МГц реализуется двухузельная модель, а при $f \leq 100$ МГц – «кластерная» модель. «Кластерная» модель также применима для описания прыжковой проводимости дырок в образцах с плотным массивом КТ Ge в Si в диапазоне частот 30-414 МГц при температурах 1,8-13 К.

**ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО В
СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:**

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

[A1] Drichko I.L. *Nonlinear high-frequency hopping conduction in two-dimensional arrays of Ge-in-Si quantum dots: Acoustic methods* / I.L. Drichko, A.M. Diakonov, V.A. Malysh, I.Yu. Smirnov, E.S. Koptev, A.I. Nikiforov, N.P. Stepina, Y.M. Galperin, J. Bergli // Solid State Communications – 2012 – Vol. 152 – pp. 860-863.

[A2] Drichko I.L. *Acoustoelectric effects in very high-mobility p-SiGe/Ge/SiGe heterostructure at low temperatures in high magnetic fields* / I.L. Drichko, V.A. Malysh, I.Yu. Smirnov, A.V. Suslov, O.A. Mironov, M. Kummer and H. von Känel // J. Appl. Phys. – 2013 – Vol. 114 – pp. 074302-1 – 074302-6.

[A3] Drichko I.L. *AC Transport in p-Ge/GeSi Quantum Well in High Magnetic Fields* / I.L. Drichko, V.A. Malysh, I.Yu. Smirnov, L.E. Golub, S.A. Tarasenko, A.V. Suslov, O.A. Mironov, M. Kummer, H. von Känel // AIP Conf. Proc. – 2014 – Vol. 1610 – pp. 53-58.

[A4] Drichko I.L. *In-plane magnetic field effect on hole cyclotron mass and g_z factor in high-mobility SiGe/Ge/SiGe structures* / I.L. Drichko, V.A. Malysh, I.Yu. Smirnov, L.E. Golub, S.A. Tarasenko, A.V. Suslov, O.A. Mironov, M. Kummer and H. von Känel // Phys. Rev. B – 2014 – Vol. 90 – pp. 125436-1 – 125436-8.

[A5] Drichko I.L. *Contactless measurement of alternating current conductance in quantum Hall structures* / I.L. Drichko, A.M. Diakonov, V.A. Malysh, I.Yu. Smirnov, Y.M. Galperin, N.D. Ilyinskaya, A.A. Usikova, M. Kummer and H. von Känel // J. Appl. Phys. – 2014 – Vol. 116 – pp. 154309-1 – 154390-7.

Другие публикации, не входящие в список ВАК:

[A6] Дричко И.Л. *Нелинейная высокочастотная прыжковая проводимость структур с квантовыми точками Ge в Si* / И.Л. Дричко, А.М. Дьяконов, В.А. Малыш, И.Ю. Смирнов, Ю.М. Гальперин, А.И. Никифоров, Н.П. Степина, Е.С. Коптев // Тезисы докладов X Российской конференции по физике полупроводников, Нижний Новгород, 2011, с. 86.

[A7] Малыш В.А. *Исследование осцилляций магнитопроводимости в гетероструктуре n-GaAs/AlGaAs методом бесконтактной микроволновой спектроскопии* / В.А. Малыш // Тезисы докладов Международной Зимней Школы по Физике Полупроводников, Санкт-Петербург-Зеленогорск, 2012, сс. 17-18.

[A8] Дричко И.Л. *Особенности высокочастотной прыжковой проводимости в системе с квантовыми точками Ge в Si. Акустические методы исследования* / И.Л. Дричко, А.М. Дьяконов, В.А. Малыш, И.Ю. Смирнов, Е.С. Коптев, А.И. Никифоров, Н.П. Степина, Ю.М. Гальперин, J. Vergli // Тезисы докладов XXXVI Совещания по физике низких температур, Санкт-Петербург, 2012, с. 200.

[A9] Малыш В.А. *Определение высокочастотной проводимости двумерного электронного газа в структуре n-GaAs/AlGaAs бесконтактными способами* / В.А. Малыш, И.Л. Дричко, И.Ю. Смирнов, А.М. Дьяконов, А.И. Торопов // Тезисы докладов Российской молодежной конференции по физике и астрономии (Физика. СПб), Санкт-Петербург, 2012, сс. 141-142.

[A10] Дричко, И.Л. *Высокочастотная проводимость в наклонном магнитном поле в структурах p-Si_{0.4}Ge_{0.6}/Ge/Si_{0.4}Ge_{0.6} с анизотропным g-фактором* / И.Л. Дричко, В.А. Малыш, И.Ю. Смирнов, А.В. Суслов, M. Kummer, H. von Känel // Тезисы докладов XVII Международного симпозиума «Нанопизика и нанозлектроника», Нижний Новгород, 2013, т. 2, сс. 439-440.

[A11] Дричко И.Л. *Бесконтактные методы измерения высокочастотной проводимости носителей заряда в квантоворазмерных системах* / И.Л. Дричко, И.Ю. Смирнов, А.М.Дьяконов, В.А. Малыш, Н.Д. Ильинская, А.А.Усикова // Тезисы докладов XI Конференции по Физике Полупроводников, Санкт-Петербург, 2013, с. 256.

[A12] Дричко И.Л. *Эволюция g-фактора и циклотронной массы дырок в наклонном магнитном поле в структурах p-Ge/SiGe с высокой подвижностью* / И.Л. Дричко, В.А. Малыш, И.Ю. Смирнов, Л.Е. Голуб, С.А. Тарасенко, А.В. Суслов // Тезисы докладов XI Конференции по Физике Полупроводников, Санкт-Петербург, 2013, с. 261.

[A13] Малыш В.А. *Акустоэлектронные эффекты в структуре p-SiGe/Ge/SiGe* / В.А. Малыш, И.Л. Дричко, И.Ю. Смирнов // Тезисы докладов Российской молодежной конференции по физике и астрономии (Физика. СПб), Санкт-Петербург, 2013, сс. 254-255.

[A14] Drichko I.L. *Acoustoelectric effects in very high mobility p-SiGe/Ge/SiGe heterostructure* / I.L. Drichko, V.A. Malysh, I.Yu. Smirnov, A.V. Suslov, O.A. Mironov, M. Kummer, and H. von Känel // Proceedings of 13th European Conference on Organised Film (ECOF), Corc, 2013, p. 39.

[A15] Малыш В.А. *Высокочастотная проводимость двумерного электронного газа в структуре n-GaAs/AlGaAs. Бесконтактные методы измерения* / В.А. Малыш // Тезисы докладов Международной Зимней Школы по Физике Полупроводников, Санкт-Петербург-Зеленогорск, 2013, сс. 14-16.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Мартинес-Дуарт Дж.М. *Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники* / Дж.М. Мартинес-Дуарт, Р.Дж. Мартин-Палма, Ф. Агулло-Рueda // Москва: Техносфера – 2007 - 368 с.
2. Wixforth A. *Quantum Oscillations in the Surface-Acoustic-Wave Attenuation Caused by a Two-Dimensional Electron System* / A. Wixforth, J.P. Kotthaus, and G. Weimann // Phys. Rev. Lett. – 1986 – Vol. 56 – pp. 2104-2106.
3. Engel L.W. *Microwave frequency dependence of integer quantum Hall effect: Evidence for finite-frequency scaling* / L.W. Engel, D. Shahar, Ç. Kurdak, and D.C. Tsui // Phys. Rev. Lett. – Vol. 71 – pp. 2638-2641.
4. Efros A.L. *High-frequency hopping electrical conductivity of disordered two-dimensional systems* / A.L. Efros // JETP – 1985 – Vol. 62, No. 5 – pp. 1057-1059.
5. Efros A.L. In “*Electron-Electron Interactions in Disordered Systems*”. Ed.: A.L. Efros and M. Pollak / A.L. Efros, B.I. Shklovskii // Elsevier – 1985 – 409 p.
6. Galperin Y.M. In “*Hopping Transport in Solids*”. Ed.: B. Shklovskii and M. Pollak / Y.M. Galperin, V.L. Gurevich, D.A. Parshin // Elsevier - 1991.
7. Wixforth A. *Surface acoustic waves on GaAs/Al_xGa_{1-x}As heterostructures* / A. Wixforth, J. Scriba, M. Wassermeier, J. P. Kotthaus, G. Weimann, and W. Schlapp // Phys. Rev. B – 1989 – Vol. 40 – pp. 7874-7887.
8. Каган В.Д. *Распространение поверхностной акустической волны в слоистой системе, содержащей двумерный проводящий слой* / В.Д. Каган // ФТП – 1997 – Т. 31, № 4 – сс. 478-482.
9. Engel L.W. *Microwave frequency dependence of integer quantum Hall effect: Evidence for finite-frequency scaling* / L.W. Engel, D. Shahar, C. Kurdak, and D.C. Tsui // Phys. Rev. Lett. – 1993 - Vol. 71 – pp. 2638-2641.
10. Stone K. *Millimeter wave transmission spectroscopy of gated two-dimensional hole systems* / K. Stone, R.R. Du, M.J. Manfra, L.N. Pfeiffer, and K.W. West // Appl. Phys. Lett. – 2012 – Vol. 100 – pp. 192104-1 – 192104-3.
11. Akira Endo *Commensurability oscillations in the radio-frequency conductivity of unidirectional lateral superlattices: Measurement of anisotropic conductivity by coplanar waveguide* / Akira Endo, Toshiyuki Kajioaka, and Yasuhiro Iye // J. Phys. Soc. Jpn. – 2013 – Vol. 82 – pp. 054710-1 – 054710-7.
12. Martin R.W. *Two dimensional spin confinement in strained quantum wells* / R.W. Martin, R.J. Warburton, R.J. Nicholas, G.J. Rees, S.K. Haywood, N.J. Mason, P.J. Walker, M.

Enemy and L.K. Howard // Proceedings of the 20th International Conference on the Physics of Semiconductors – 1990 – Vol. 2 – pp. 909-912