

*На правах рукописи*

Спирин Кирилл Евгеньевич

**МАГНИТОТРАНСПОРТ И ТЕРАГЕРЦОВЫЙ ОТКЛИК В  
ДВУМЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ**

05.27.01 — твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и нанoeлектроника,  
приборы на квантовых эффектах

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород  
2008

Работа выполнена в Институте физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН), г. Нижний Новгород

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Гавриленко Владимир Изяславович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Фирсов Дмитрий Анатольевич  
Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет

кандидат физико-математических наук  
Дроздов Михаил Николаевич  
Институт физики микроструктур  
Российской академии наук

Ведущая организация ГОУ ВПО Московский педагогический  
государственный университет

Защита состоится 13 ноября 2008 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.098.01 при Институте физики микроструктур РАН (603950, г.Нижний Новгород, ГСП-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН.

Автореферат разослан “9” октября 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук  
профессор

К.П.Гайкович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Освоение терагерцового диапазона частот – одно из наиболее активно развивающихся направлений современной физики. Электромагнитные волны терагерцового диапазона отражаются металлами, но они проникают через пластмассы, бумагу, сухую древесину и любые мутные среды и мелкодисперсные материалы из-за малости рэлеевского рассеяния ( $\propto 1/\lambda^4$ ). Однако терагерцовый диапазон все еще недостаточно «освоен» твердотельными приборами. Такие приборы могут найти широкое применение для формирования терагерцового изображения в медицине, в качестве химических и биологических сенсоров, в широкополосной связи, радиоастрономии, для диагностики атмосферы со спутников, в компьютерной технике, при разработке систем безопасности на основе терагерцового видения и в других областях.

Для детектирования терагерцового излучения на сегодняшний день в основном применяются широкополосные приемники излучения: болометры, фотопроводящие детекторы и др. Использование же селективных и перестраиваемых детекторов при спектральном анализе позволяет отказаться от дифракционных решеток или механически перестраиваемых интерферометров. Таким селективным детектором может быть приемник на свободных носителях, работающий в условиях квантового эффекта Холла (КЭХ) [1,2]. Исследованию такого приемника уделено значительное внимание в данной работе.

Другой чрезвычайно интересной и быстро развивающейся областью является спиновая электроника – спинтроника [3]. Спин-зависимые явления привлекают внимание исследователей поскольку электронный спин является аналогом бита информации. Очень перспективными системами для развития приборов спинтроники являются исследованные в работе структуры на основе узкозонных материалов, поскольку в таких структурах сильно проявляется эффект Рашбы, а величина g-фактора в типичном узкозонном полупроводнике InAs составляет -15 (в то время как GaAs -0,4).

## Цели работы :

- Исследование зеемановского расщепления уровней Ландау двумерных электронов в гетероструктурах InAs/AlSb и определение эффективного g-фактора;
- Исследование влияния ширины квантовой ямы InAs/AlSb на закон дисперсии электронов;
- Определение влияния латерального электрического поля на поглощение на циклотронном резонансе (ЦР) электронов и дырок на кинетику релаксации в гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами при импульсном оптическом возбуждении носителей;
- Детальное изучение механизма фотоотклика приемника на ЦР в условиях КЭХ на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs по эволюции релаксации отклика при изменении магнитного поля

## Научная новизна

Научная новизна работы определяется оригинальностью поставленных экспериментов, полученными новыми результатами, и заключается в следующем:

1. Значения эффективного фактора Ланде электронов в гетероструктурах InAs/AlSb квантовыми ямами (КЯ) определены при различных значениях концентрации двумерных электронов и при различных толщинах квантовых ям InAs (в отличие от предшествующих работ, где исследовались только структуры с шириной квантовой ямы 15 нм при фиксированной концентрации электронов). Для трех значений толщин квантовых ям (12, 15 и 18 нм) показано, что наблюдаемые значения эффективных циклотронных масс электронов удовлетворительно согласуются с результатами расчетов в рамках модели Кейна для непараболической зоны проводимости.
2. В спектрах циклотронного резонанса объемного кремния в квантующих магнитных полях при межзонном оптическом возбуждении носителей обнаружена предсказываемая теорией линия перехода с одного из нижних уровней Ландау тяжелых дырок, которую ранее не удавалось разрешить в спектрах.
3. Показано, что разогрев в латеральном электрическом поле приводит к укорачиванию как «быстрого», так и «медленного»

времени релаксации сигнала циклотронного резонанса электронов и дырок в гетероструктурах Ge/GeSi II типа при импульсном межзонном возбуждении носителей. Обнаружено, что на общую тенденцию укорочения времен релаксации с электрическим полем накладывается резкий рост «медленного» времени релаксации при пробое очень мелких акцепторов (энергия связи  $\sim 2$  мэВ).

4. Обнаружено, что «быстрое» время релаксации отклика на терагерцовое излучение детектора на циклотронном резонансе электронов в гетероструктуре GaAs/AlGaAs имеет глубокий минимум в центре плато квантового эффекта Холла, что обусловлено фундаментальным свойством выключения экранирования случайного потенциала примесей в условиях квантового эффекта Холла, в то время как «медленное» время релаксации практически не зависит от магнитного поля. Показано, что 300-градусная фоновая подсветка приводит к уменьшению времен релаксации на 2 порядка, что связано с большой концентрацией неравновесных носителей, генерируемых фоновым излучением.

### **Научная и практическая значимость результатов**

Научная значимость полученных результатов заключается в экспериментальном обнаружении зависимости обменного усиления фактора Ланде электронов и их циклотронных масс в гетероструктурах InAs/AlSb от ширины квантовой ямы. Проведенные исследования циклотронного резонанса дырок в кремнии в квантующих магнитных полях позволили уточнить значение одного из параметров Латтинджера. Обнаруженное увеличение времени «медленной» релаксации концентрации возбуждаемых светом неравновесных носителей в гетероструктурах Ge/GeSi при ударной ионизации очень мелких акцепторов подтверждает предложенный ранее механизм долговременной релаксации через рекомбинацию свободных дырок, термически возбуждаемых с этих примесных центров. Обнаруженная сильно немонотонная зависимость от магнитного поля времени быстрой релаксации отклика на терагерцовое излучение детектора на циклотронном резонансе электронов в гетероструктуре GaAs/AlGaAs свидетельствует об определяющей роли случайного потенциала в механизме фотоотклика.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при создании электронных и оптоэлектронных приборов на основе квантоворазмерных структур InAs/AlSb и Ge/Si.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Абсолютная величина эффективного  $g^*$ -фактора электронов в гетероструктурах InAs/AlSb с 2D газом, определяемая из зеемановского расщепления осцилляций Шубникова – де Гааза, значительно превышает рассчитанное в рамках модели Кейна значение в квантовых ямах InAs вследствие обменного электрон-электронного взаимодействия.
2. Циклотронная масса электронов в гетероструктурах InAs/AlSb с 2D электронным газом увеличивается при уменьшении толщины квантовой ямы InAs от 18 нм до 12 нм вследствие непараболичности зоны проводимости.
3. В гетероструктурах Ge/GeSi II типа с остаточными мелкими примесями, возбуждаемых межзонной подсветкой, приложение греющего латерального электрического поля приводит в целом к ускорению релаксации сигнала поглощения (на ЦР электронов и дырок). При этом в электрических полях, соответствующих ударной ионизацией очень мелких (2 мэВ) акцепторов наблюдается замедление релаксации.
4. Релаксация фотоотклика на ЦР 2D электронов в гетероструктуре GaAs/AlGaAs в условиях КЭХ не описывается одним временем релаксации. Зависимость «быстрого времени», определяемого масштабом флуктуаций случайного потенциала, от магнитного поля имеет минимум в центре плато КЭХ и два максимума на краях плато, что связано с фундаментальным свойством «выключения» экранирования случайного потенциала в условиях КЭХ. 300-градусная подсветка приводит к значительному падению времени релаксации вследствие генерации неравновесных носителей фоновым излучением.

### **Личный вклад автора в получение результатов**

- Основной – в подготовку и проведение исследования спектров циклотронного резонанса дырок в кремнии в квантующих магнитных полях, обработку и интерпретацию результатов

[A1, A2].

- Равнозначный (совместно с А.В.Иконниковым) – в подготовку и проведение экспериментов по исследованию примесного поглощения гетероструктур Ge/GeSi с квантовыми ямами, обработку и интерпретацию результатов, [A3-A6, A11, A12, A22].
- Равнозначный (совместно с С.В.Морозовым) – в проведение исследования эволюции времени фотоотклика на циклотронном резонансе двумерных (2D) электронов в GaAs/AlGaAs в условиях квантового эффекта Холла; (основной) – в обработку и интерпретацию их результатов [A16, A18, A20, A23, A25].
- Основной – в подготовку и проведение исследований магнитотранспорта в гетероструктурах InAs/AlSb в условиях, обработку и интерпретацию их результатов [A17, A19, A24].

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертации докладывались на 13, 14 и 15 Международных симпозиумах «Наноструктуры: физика и технология» (2005, 2006, Санкт-Петербург, 2007 Новосибирск), Всероссийских совещаниях «Нанопотоника» (2003, 2004, Нижний Новгород), 7 и 8 российской конференции по физике полупроводников (2005, Звенигород, 2007, Екатеринбург), 6 Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (2004, Санкт-Петербург), 10 и 11 Нижегородской сессии молодых ученых (2005, Дзержинск, 2006, Кстово,) Всероссийских симпозиумах «Нанопизика и наноэлектроника» (2005, 2006, 2007, Нижний Новгород), 12-й Международной конференции по узкозонным полупроводникам (2005, Тулуза, Франция), а также на семинарах ИФМ РАН и ННГУ.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликованы 25 печатных работ, в том числе, 4 статьи в реферируемых журналах, 2 статьи в продолжающемся рецензируемом издании «Institute of Physics Conference Series» и 19 публикаций в сборниках тезисов докладов и трудов конференций, симпозиумов и совещаний.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 145 страниц, включая 77 рисунков и 8 таблиц. Список цитированной литературы включает 105 наименований, список работ автора по теме диссертации - 25 наименований.

## Основное содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, показана её научная новизна, сформулированы цели работы и приведены положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** приведен обзор литературы по всем исследованным в диссертации объектам. В первой части обзора рассмотрен механизм квантового эффекта Холла, дан обзор работ, посвященные исследованию квантового эффекта Холла в гетероструктурах GaAs/AlGaAs, рассматриваются работы по изучению фотопроводимости гетероструктур GaAs/AlGaAs на ЦР электронов в условиях квантового эффекта Холла и возможности перестройки области фоточувствительности, приводятся достигнутые характеристики фотоприемников. Вторая часть обзора посвящена исследованию эффективного фактора Ланде. Рассматриваются работы по экспериментальному изучению и теоретическим расчетам обменного усиления g-фактора. Третья часть первой главы посвящена обзору работ по изучению двумерных полупроводниковых систем Ge/GeSi и  $A_3B_5$  методом циклотронного резонанса. Рассматриваются также работы по исследованию циклотронного резонанса дырок в объемном Si в квантующих магнитных полях.

**Глава 2** посвящена исследованию электронного транспорта в 2D электронном газе в гетероструктурах InAs/AlSb. В первой части главы 2 приведено описание исследованных в работе гетероструктур, представлена методика экспериментального исследования электронного транспорта (осцилляции Шубникова – де Гааза). Во второй части приведены результаты теоретического расчета уровней Ландау в квантовых ямах InAs/AlSb в рамках модели Кейна [4] и кратко описан метод расчета. В третьей части второй главы приведены



экспериментальные результаты по определению эффективного фактора Ланде по зеemanовскому расщеплению осцилляций Шубникова – де Гааза и их сравнение с теоретическими расчетами. Обнаруженное в работе большее по сравнению с объемным материалом (по абсолютной величине) значение  $g$ -фактора (до  $-35$ ) связывается с обменным электрон-электронным взаимодействием [5]. Изучена зависимость эффективного фактора Ланде от ширины квантовой ямы (исследовались гетероструктуры с шириной квантовой ямы 12, 15 и 18 нм). Обнаружено заметное возрастание  $g$ -фактора при увеличении ширины КЯ.

В **Главе 3** методом циклотронного резонанса исследуются три объекта – гетероструктуры InAs/AlSb, объемный кремний и гетероструктуры Ge/GeSi. Первая часть Главы 3 посвящена экспериментальному исследованию циклотронного резонанса в гетероструктурах InAs/AlSb с различной шириной квантовых ям (от 12 нм до 18 нм). Обнаружено заметное увеличение циклотронной массы при уменьшении ширины квантовой ямы и с ростом концентрации электронов (изменяемой за счет эффекта остаточной фотопроводимости). Представлены результаты теоретических расчетов величин циклотронной массы, выполненных В.Я.Алешкиным и С.С.Криштопенко. Продемонстрировано хорошее согласие результатов расчетов с данными эксперимента, что позволяет связать эффект возрастания массы с непараболичностью зоны проводимости. Во второй части исследуется циклотронный резонанс дырок в Si в квантовых магнитных полях. Приводится описание и результаты эксперимента, в котором была обнаружена новая линия поглощения, а также сравнение результатов с теоретически рассчитанными линиями переходов между уровнями Ландау дырок из работы [6]. В последней части третьей главы исследуется релаксация поглощения на циклотронном резонансе в гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами при межзонном оптическом возбуждении носителей. Описана методика измерений дифференциального магнитопоглощения, приводится теоретическая модель релаксационных процессов и экспериментальные результаты по наблюдению ускорения релаксации при приложении электрического поля и примесном пробое, свидетельствующие об определяющей роли очень мелких

(энергия связи около 2 мэВ) акцепторов в механизме долговременной релаксации свободных носителей.

**Глава 4** посвящена изучению зависимостей времени релаксации фотоотклика на циклотронном резонансе в условиях квантового эффекта Холла на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs от магнитного поля вблизи четных значений фактора заполнения уровней Ландау. Использовались тепловой источник излучения и два импульсных излучателя терагерцового диапазона: возбуждаемый электрическим током кристалл р-Ge, находящийся в жидком гелии и полупроводниковый излучатель, возбуждаемый оптическими импульсами фемтосекундной длительности. Дано описание исследуемого образца, представляющего собой длинный (17 см) холловский мостик шириной 50 мкм, «свернутый» в меандр, заполняющий приемную площадку размером 4×4 мм [7], и описаны условия эксперимента для каждого источника терагерцового излучения. Полученные осциллограммы фотоотклика анализируются на основе биэкспоненциального приближения релаксации сигнала. Обнаружено сильно немонотонное поведение быстрого времени фотоотклика в пределах плато квантового эффекта Холла, связанное с выключением экранирования двумерными электронами случайного потенциала, играющего ключевую роль в механизме фотоотклика [7], в то время как долгое время релаксации оказалось нечувствительным к магнитному полю, что указывает на иной механизм релаксации долговременного фотоотклика.

В **Заключении** представлены основные результаты, полученные в работе.

## **Основные результаты работы**

1. Впервые исследована эволюция осцилляций Шубникова – де Гааза в гетероструктурах InAs/AlSb с двумерным электронным газом в квантовой яме InAs шириной 15 нм при значительном изменении концентрации  $(3-8) \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$  за счет эффекта отрицательной остаточной фотопроводимости. По спиновому расщеплению осцилляций определены значения эффективного фактора Ланде электронов  $g^* = -(15 \div 20)$ , которые оказались значительно больше, чем расчетные значения в рамках модели

Кейна для квантовых ям ( $g^* \approx -9$ ), что связывается с обменным взаимодействием. Из сопоставления зеемановского расщепления осцилляций ШДГ в нормальном и наклонном (под  $45^\circ$ ) магнитном поле сделана оценка анизотропии эффективного  $g^*$ -фактора  $g_{\parallel}/g_{\perp} = 0,8$ .

2. Проведено сравнительное исследование зеемановского расщепления в гетероструктурах InAs/AlSb с тремя различными толщинами квантовых ям InAs (12, 15 и 18 нм) при концентрации 2D электронов  $n_s \sim 6 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Показано, что в образце с самой широкой квантовой ямой 18 нм величина наблюдаемого зеемановского расщепления осцилляций Шубникова – де Гааза соответствует  $|g^*| \geq 35$ , тогда в образце с узкой квантовой ямой 12 нм величина расщепления позволяет сделать оценку  $|g^*| \leq 16$ . Обнаруженная зависимость фактора Ланде от ширины квантовой ямы может быть связана как с соответствующей зависимостью одноэлектронного  $g$ -фактора, так и с уменьшением перекрытия уровней Ландау с противоположным спином в более широкой (лучшего качества) квантовой яме, что должно приводить к росту обменного усиления  $g$ -фактора.

3. В спектрах ЦР объемного кремния  $\text{H}||[001]$  в квантующих магнитных полях при межзонном оптическом возбуждении носителей обнаружена линия ЦР дырок, связываемая с переходом с нижнего уровня Ландау тяжелых дырок, которую ранее не удавалось разрешить в спектрах. Полученный результат позволяет уточнить константу Латтинджера  $\gamma_2 = 0,31$ .

4. В гетероструктурах Ge/GeSi II типа с остаточными мелкими примесями (как акцепторами, так и донорами) исследована релаксация сигнала ЦР 1L электронов (квантовые ямы GeSi) и дырок (квантовые ямы Ge) в терагерцовом диапазоне при импульсном оптическом возбуждении при  $T = 4,2 \text{ К}$ . Обнаружено, что в отличие от ЦР дырок, релаксация сигнала которого всегда происходит с двумя характерными временами (быстрым и медленным), характер релаксации линии циклотронного резонанса электронов зависит от толщины слоя Ge. В образце с широкими (800 Å) слоями Ge релаксация сигнала ЦР электронов также происходит с двумя временами, в то время как в образце с более узкими (330 Å) слоями Ge релаксация ЦР электронов происходит только с одним (быстрым) временем. В

случае ЦР дырок медленное время релаксации определяется скоростью рекомбинации очень мелких (2 мэВ) нейтральных акцепторов, «поставляющих» дырки в валентную зону за счет термической ионизации на втором этапе рекомбинации. Отсутствие медленно релаксирующего сигнала ЦР электронов объясняется большей энергией связи доноров (10 мэВ), не отдающих таким образом электроны в зону проводимости. Появление долговременной релаксации линии ЦР электронов в образце с широкими слоями Ge связано с рекомбинацией электронов в слоях GeSi на нейтральных акцепторах, находящихся в слоях Ge на расстоянии от интерфейса, многократно превышающем боровский радиус ( $\sim 50 \text{ \AA}$ )

5. Исследовано влияние латерального электрического поля на релаксацию сигнала ЦР электронов и дырок в гетероструктурах Ge/GeSi. Показано, что разогрев в электрическом поле приводит к укорачиванию как быстрого, так и медленного времени релаксации, что обусловлено ростом темпа рекомбинации свободных носителей на нейтральных примесях и ускорением потока частиц из примесей в зону соответственно. Обнаружено, что на общую тенденцию укорочения времен релаксации с электрическим полем накладывается резкий рост длинного времени релаксации вблизи поля пробоя очень мелких акцепторов (энергия связи  $\sim 2$  мэВ). Последний эффект связывается с наличием иерархии энергии связи акцепторов от сравнительно глубоких в центре квантовой ямы Ge (6-7 мэВ) до очень мелких (2 мэВ) в случае расположения примесного иона в центре барьера GeSi. Наблюдаемый примесный пробой связан с ударной ионизацией наиболее мелких акцепторов, расположенных вблизи гетерограницы, что приводит к уменьшению темпа генерации дырок за счет термоионизации оставшихся более глубоких примесей и к увеличению длинного времени рекомбинации электронов.

6. Определены значения эффективных циклотронных масс электронов в гетероструктурах InAs/AlSb с тремя различными толщинами квантовых ям InAs (12, 15 и 18 нм) при значительном (до трех раз) изменении концентрации двумерных электронов за счет эффекта остаточной фотопроводимости. Показано, что зависимости эффективных масс от концентрации и толщины ям

удовлетворительно согласуются с результатами расчетов в рамках модели Кейна для непараболической зоны проводимости.

7. Исследована релаксация отклика на терагерцовое излучение детектора на циклотронном резонансе электронов в гетероструктуре GaAs/AlGaAs ( $n_s = 3,6 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ,  $T = 2,4 - 4,2 \text{ К}$ ) в условиях квантового эффекта Холла (КЭХ) вблизи четных значений фактора заполнения уровней Ландау  $\nu = 2, 4$ . Установлено, что релаксация фотоотклика происходит с двумя характерными временами. Показано, что зависимость «быстрого» времени отклика от магнитного поля имеет глубокий минимум в центре плато КЭХ и два острых максимума на краях плато. Падение времени отклика за пределами плато КЭХ связывается с равновесной заселенностью уровня Ландау над/под уровнем Ферми электронами/дырками соответственно, что увеличивает вероятность рекомбинации фотовозбужденных носителей. Минимум в центре плато обусловлен фундаментальным свойством выключения экранирования случайного потенциала примесей в условиях КЭХ.

8. Впервые исследованы временные характеристики фотоотклика на ЦР 2D электронов в условиях квантового эффекта Холла при подсветке образца 300-градусным фоновым излучением. Измерения проводились с использованием пикосекундных импульсов терагерцового излучения, генерируемых излучением фемтосекундного лазера. Обнаружено, что подсветка приводит к уменьшению времен релаксации на 2 порядка (при  $\nu = 4$ ;  $T = 4,2 \text{ К}$ ), что объясняется большой концентрацией неравновесных носителей, генерируемых фоновым излучением. Продемонстрировано, что в условиях фоновой подсветки многократно возрастает относительная величина фотоотклика в минимумах  $\rho_{xx}$ , соответствующих большим значениям фактора заполнения уровней Ландау ( $\nu = 6 - 14$ ), что обусловлено сильным влиянием «фоновых» носителей на время релаксации в условиях хорошо развитого плато КЭХ ( $\nu = 4$ ) и слабым влиянием в меньших магнитных полях в условиях сильного перекрытия уровней Ландау. Детально исследован биэкспоненциальный характер релаксации сигнала фотоотклика вблизи  $\nu = 4$ . Обнаружено, что «быстрое» время релаксации, как и в отсутствие фонового излучения, имеет острый максимум на

краю плато КЭХ, в то время как «длинное время» и связанная с ним часть фотоотклика практически не зависят от магнитного поля, что указывает на иную природу «медленного» фотоотклика.

### **Список цитированной литературы**

1. Highly sensitive and tunable detection of far-infrared radiation by quantum Hall devices // Y. Kawano, Y. Hisanaga, H. Takenouchi, S. Komiyama // *J. Appl. Phys.* – 2001. Vol.89, No 7, P. 4037-4048.
2. Kawano, Y. Breakdown on the quantized Hall effect in the vicinity of current contact / Y. Kawano, S. Komiyama // *Phys. Rev. B* – 2000. Vol.61, N 1. P. 2931-2938.
3. *Semiconductor Spintronics and Quantum Computation.* - Germany: Springer, 2002. - ISBN 3-540-42176-9. / Awschalom D.D, Loss D., Samarth N.
4. Kane E.O. Band structure of indium antimonide / E.O. Kane // *J. Phys. Chem. Solids.* — 1957. — 1, Issue 4, — P. 249-261.
5. Ando, T. Theory of Oscillatory g Factor in an MOS Inversion Layer under Strong Magnetic Fields/ T.Ando, Y.Uemura // *J. Phys. Soc. Japan* – 1977. – 37 – P. 1044.
6. Owner-Petersen, M. Cyclotron resonance of holes in Si / M. Owner-Petersen and M.R. Samuelsen // *Phys. Stat. Sol.* – 1968. – 28. – P. 211-222.
7. Kawano, Y. Highly sensitive and tunable detection of far-infrared radiation by quantum Hall devices / Y. Kawano, Y. Hisanaga, S. Komiyama // *Journ. Appl. Phys.* 2001.– 89. – P. 4037-4048.

### **Основные публикации автора по теме диссертации**

[A1] Векслер, Д.Б. Циклотронный резонанс дырок в кремнии в квантующих магнитных полях / Д.Б.Векслер, В.И.Гавриленко, К.Е.Спирин // *ФТТ.* – 2004 – Т.46, Вып.1, – С.150-151.

[A2] Алешкин, В. Я. Мелкие акцепторы в гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами в магнитном поле / В. Я. Алешкин, А. В. Антонов, Д. Б. Векслер, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, А. В. Иконников, Д. В. Козлов, О. А. Кузнецов, К. Е. Спирин // *ФТТ.* –2005. – Т. 47, вып. 1. – С. 74–79.

[A3] В.Я.Алешкин, В.И.Гавриленко, А.В.Иконников, С.С.Криштопенко, Ю.Г.Садофьев, К.Е.Спирин. Обменное

усиление g-фактора в гетероструктурах InAs/AlSb. ФТП – 2008. – Т.42. – С.846–851.

[A4] Spirin, K. E. Magnetic field dependence of the photoresponse time of GaAs/AlGaAs quantum Hall effect device / K. E. Spirin, S. V. Morozov, V. I. Gavrilenko, Y. Kawaguchi, S. Komiyama // *Semicond. Sci. Technol.* 2008 –**23**–095014(5pp).

[A5] Векслер, Д.Б. Циклотронный резонанс дырок в кремнии в квантовых магнитных полях / Д.Б.Векслер, В.И.Гавриленко, К.Е.Спирин // *Нанофотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 2003.* – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2003. – С. 486-488.

[A6] Алешкин, В.Я. Очень мелкие акцепторные состояния в многослойных гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами:  $A^+$ -центры и  $A^0$ -центры с пространственным разделением иона примеси и дырки / В.Я.Алешкин, Д.Б.Векслер, В.И.Гавриленко, И.В.Ерофеева, А.В.Иконников, Д.В.Козлов, К.Е.Спирин, О.А.Кузнецов. // *Нанофотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 2–6 мая 2004.* – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2004. – С. 129–132.

[A7] Алешкин, В. Я. Примесное магнитопоглощение гетероструктур Ge/GeSi с квантовыми ямами в квантовых магнитных полях / В. Я. Алешкин, А. В. Антонов, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, А. В. Иконников, Д. В. Козлов, О. А. Кузнецов, К. Е. Спирин // *Нанофизика и нанoeлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2005.* — Нижний Новгород: ИФМ РАН 2005. — С. 397—398.

[A8] Ikonnikov, A. V. Differential shallow impurity absorption in Ge/GeSi QW heterostructures in THz range at pulsed bandgap photoexcitation / A. V. Ikonnikov, K. E. Spirin, O. A. Kuznetsov [et al.] // *Nanostructures: Physics and technologies: Proc. 13<sup>th</sup> Int. Symp., St. Petersburg, June 20—25, 2005.* — St. Petersburg: Ioffe Institute, 2005. – P. 246–247.

[A9] Gavrilenko, V. I. Positive and negative persistent photoconductivity in InAs/AlSb QW heterostructures: control of 2DEG concentration and built-in electric field / V. I. Gavrilenko,

A. V. Ikonnikov, K. V. Maremyanin, S.V.Morozov, K.E.Spirin, Yu.G.Sadofyev, S.R.Johnson, Y.-H.Zhang. // Nanostructures: Physics and technologies: Proc. 13<sup>th</sup> Int. Symp., St. Petersburg, June 20–25, 2005. – St. Petersburg: Ioffe Institute, 2005. – P.396–398.

[A10] Maremyanin, K. V. Spectral study of persistent photoconductivity in InAs/AlSb QW heterostructures / K. V. Maremyanin, K. E. Spirin, A. V. Ikonnikov [et al.] // Narrow Gap Semiconductors: Abstr. of 12<sup>th</sup> Int. Conf. Toulouse, France, July 3–7, 2005. – P. 21.

[A11] Ikonnikov, A. V. Cyclotron resonance study of InAs/AlSb QW heterostructures / A. V. Ikonnikov, V. I. Gavrilenko, K.E.Spirin [et al.] // Narrow Gap Semiconductors: Abstr. of 12<sup>th</sup> Int. Conf. Toulouse, France, July 3–7, 2005. — P. 101.

[A12] Гавриленко, В.И. Положительная и отрицательная остаточная фотопроводимость в гетероструктурах InAs/AlSb с квантовыми ямами / В.И.Гавриленко, А.В.Иконников, К.В.Маремьянин, С.В.Морозов, К.Е.Спирин, Ю.Г.Садофьев, J.Bird, Y.-H. Zhang // VII Росс. конф. по физике полупроводников: Тез. докл., Звенигород, Россия, 18–23 сентября 2005. — М.: ФИАН. — С. 99.

[A13] Алешкин, В. Я. Дифференциальное примесное магнитопоглощение в ТГц-диапазоне в гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами при импульсном межзонном возбуждении / В.Я.Алешкин, В.И.Гавриленко, А.В.Иконников, О.А.Кузнецов, К.Е.Спирин // VII Росс. конф. по физике полупроводников: Тез. докл., Звенигород, Россия, 18–23 сентября 2005. — М.: ФИАН. — С. 197.

[A14] Алешкин, В. Я. Примесное поглощение гетероструктур Ge/GeSi с квантовыми ямами в квантующих магнитных полях / В. Я. Алешкин, А. В. Антонов, В. И. Гавриленко, И. В. Ерофеева, А. В. Иконников, Д. В. Козлов, О. А. Кузнецов, К. Е. Спирин // VII Росс. конф. по физике полупроводников: Тез. докл., Звенигород, Россия, 18–23 сентября 2005. – М.: ФИАН. – С. 307.

[A15] Maremyanin, K. V. Spectral study of persistent photoconductivity in InAs/AlSb QW heterostructures / K. V. Maremyanin, K. E. Spirin, A. V. Ikonnikov [et al.] // Narrow



Gap Semiconductors, Institute of Physics Conference Series No. 187. — New York, 2006. — P. 137—142.

[A16] Ikonnikov, A. V. Cyclotron resonance study of InAs/AlSb QW heterostructures / A. V. Ikonnikov, S. S. Krishtopenko, K. E. Spirin [et al.] // Narrow Gap Semiconductors, Institute of Physics Conference Series No. 187. — New York, 2006. — P. 579—584.

[A17] Алешкин, В. Я. Исследование примесного магнитопоглощения в гетероструктурах Ge/GeSi при импульсном фотовозбуждении / В.Я.Алешкин, А.В.Иконников, В.И.Гавриленко, О.А.Кузнецов, К.Е.Спирин // Нанозлектроника и нанозлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2006. — Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. — Т. 2. — С. 328—329.

[A18] Морозов, С. В. Эволюция времени фотоотклика приемника на циклотронном резонансе 2D электронов в GaAs/AlGaAs в условиях квантового эффекта Холла / С.В.Морозов, В.И.Гавриленко, К.Е.Спирин // Нанозлектроника и нанозлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 13 - 17 марта 2006. — Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. — С. 445-446.

[A19] Гавриленко, В. И. Особенности магнетотранспорта в гетероструктурах InAs/AlSb в условиях остаточной фотопроводимости / В.И.Гавриленко, Ю.Г.Садофьев, К. Е. Спирин [и др.] // Нанозлектроника и нанозлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 2006. — Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. — С. 453-454.

[A20] Spirin, K.E. Evolution of the photoresponse time of GaAs/AlGaAs QHE device / K.E.Spirin, S.V.Morozov, V.I.Gavrilenko [et al.] // Proc. 14<sup>th</sup> Int. Symp., St. Petersburg, June 26—30, 2006. — St. Petersburg: Ioffe Institute, 2006. — P. 254-255.

[A21] Гавриленко, В. И. Обменное усиление g-фактора в гетероструктурах InGaAs/GaAs с двумерным электронным газом / В.И.Гавриленко, С. С. Криштопенко, Ю. Г. Садофьев, К. Е. Спирин [и др.] // Нанозлектроника и нанозлектроника: Материалы международного симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 2007. — Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2007. — С. 313-314.

[A22] Антонов, А. В. Развитие методов спектроскопии полупроводниковых наноструктур с использованием терагерцового излучения, генерируемого импульсами фемтосекундного лазера / А.В.Антонов, В.И.Гавриленко, З.Ф.Красильник, Д.И.Курицын, С.В.Морозов, К.Е.Спирин // Нанофизика и нанoeлектроника: Ма -териалы международного симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 10 - 14 марта 2007. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2007. – С. 408-409.

[A23] Алешкин, В.Я. Циклотронный резонанс 2D электронов и дырок в квантующих магнитных полях / В.Я.Алешкин, Ю. Б. Васильев, В.И. Гавриленко, Б.Н.Звонков, А.В.Иконников, Д.В.Козлов, С.С.Криштопенко, М.Л.Орлов, Ю.Г.Садофьев, К.Е.Спирин, М.Л.Sadowski, M.Goiran, W.Клар // VIII Российская конференция по физике полупроводников: Тезисы докладов, Екатеринбург, Россия, 30 сентября – 5 октября 2007.

[A24] Гавриленко, В. И. Влияние электрического поля на магнитопоглощение в ТГц диапазоне в гетероструктурах Ge/GeSi с квантовыми ямами при межзонном фотовозбуждении носителей / В. И. Гавриленко, А.В. Иконников, О. А. Кузнецов, К.Е. Спирин // "Полупроводники 2007": Тезисы докладов, Екатеринбург, Россия, 30 сентября – 5 октября 2007.

[A25] Гавриленко, В. И. Эволюция времени фотоотклика на циклотронном резонансе 2D электронов в GaAs/AlGaAs в условиях квантового эффекта Холла / В. И. Гавриленко, К.Е.Спирин, С.В.Морозов [и др.] // VIII Российская конференция по физике полупроводников: Тезисы докладов, Екатеринбург, Россия, 30 сентября – 5 октября 2007.

Спирин Кирилл Евгеньевич

**МАГНИТОТРАНСПОРТ И ТЕРАГЕРЦОВЫЙ ОТКЛИК В  
ДВУМЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 25.09.2008 г. Тираж 100 экз.  
Отпечатано в Институте физики микроструктур РАН  
603950, Нижний Новгород, ГСП-105