УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РАН

На правах рукописи

КЛИМЕНКО Олег Александрович

**ГЕНЕРАЦИЯ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва

2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) и в университете Монпелье 2 (Монпелье, Франция)

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Митягин Юрий Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Гавриленко Владимир Изяславович

кандидат физико-математических наук
Трофимов Владимир Тимофеевич

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

Защита состоится 28 ноября 2011 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 при ФИАН по адресу 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН (комн. 13)

Автореферат разослан 27 октября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических
наук, профессор

А.С. Шиканов

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Одной из важных проблем современной физики твердого тела является так называемое «Терагерцовое окно». Терагерцовая (ТГц) область частот (0,3-10 ТГц) в спектре электромагнитных волн является промежуточной между оптическим и радио диапазонами, что обуславливает ряд характерных особенностей. ТГц излучение отражается металлами, но проникает через, бумагу, пластмассы, сухую древесину и мелкодисперсные материалы из-за существенно меньшей величины рэлеевского рассеяния по сравнению с оптическим диапазоном. В атмосфере ТГц излучение поглощается преимущественно парами воды, однако есть целый ряд окон прозрачности, особенно в низкочастотной части спектра. В ТГц диапазоне лежат вращательные спектры многих органических молекул, включая наркотические вещества и биологически важные коллективные моды ДНК и белков. При этом энергия квантов ТГц излучения не достаточна для разрушения химических связей молекул, поэтому оно является безопасным для живых существ и, в частности, для человека.

Благодаря своим особенностям, ТГц излучение имеет множество практических применений. Так, в астрофизике ТГц спектроскопия позволяет проследить, например, эволюцию химического состава удаленных объектов. С помощью ТГц излучения можно управлять протеканием химических реакций [1] и манипулировать электронными состояниями в квантовых ямах [2]. В медицине использование ТГц излучения позволяет проводить безвредную для человека диагностику, в том числе раковых опухолей, глубины и степени ожогов [3]. Также возможно использование ТГц излучения в области телекоммуникаций и в сфере безопасности, в частности, для распознавания опасных или наркотических веществ, отправляемых по почте, или для проверки багажа в аэропортах, на вокзалах и в других местах.

В большинстве приложений для детектирования ТГц излучения наиболее желаемым прибором является матрица чувствительных элементов, не превосходящих по размерам длины волны, встроенных в одну интегральную схему и позволяющих проводить наблюдение в режиме реального времени. Среди всех твердотельных детекторов ТГц диапазона наиболее подходящими на роль таких

чувствительных элементов представляются обладающие высоким быстродействием и микронными размерами полевые транзисторы, из которых, используя уже известные технологии, можно создать матрицу элементов на базе одной микросхемы. Теоретическая модель детектирования и генерации ТГц излучения полевыми транзисторами была разработана М. И. Дьяконовым и М. С. Шуром [4, 5] в середине 90х гг. В 2002 году В. Кнап и соавторы [6-8] экспериментально продемонстрировали детектирование ТГц излучения полевыми транзисторами в широком диапазоне температур (8 – 300 К). В основе механизма детектирования лежит возбуждение падающим излучением плазменных колебаний в двумерном электронном газе канала транзистора и их последующее выпрямление на нелинейности, связанной с одновременной модуляцией падающим излучением концентрации и дрейфовой скорости носителей в канале. Как правило, возбуждение электронной плазмы, возникшее с одной стороны канала, затухает, прежде чем достигнуть другой стороны, и величина сигнала детектирования слабо зависит от частоты падающего излучения. Но, в определенных случаях, зависимость фотоотклика (выпрямленное напряжение, возникающее между стоком и истоком вследствие детектирования) от частоты падающего излучения носит резонансный характер [5]. При этом затухание плазменных волн достаточно мало и канал транзистора достаточно короткий, так что транзистор ведет себя как резонатор для плазменных колебаний, собственные частоты которого лежат в ТГц области и зависят от напряжения на затворе, определяющего концентрацию электронов в канале. В дальнейшем было показано [9, 10], что приложенный вдоль канала ток усиливает такой резонансный отклик и делает его более узким. Однако по-прежнему остаются открытыми вопросы о физическом пределе чувствительности полевых транзисторов как детекторов ТГц излучения (особенно при комнатной температуре) и о том, как, помимо оптимизации приемной антенны, можно увеличить их чувствительность. В связи с этим в настоящей работе были проведены исследования нерезонансного детектирования различных типов полевых транзисторов в широком диапазоне температур (5 – 300 К).

Недавно в работе [11] был предложен новый механизм увеличения фотоотклика полевого транзистора за счет приложенного перпендикулярно каналу постоянного магнитного поля. Представленная теоретическая модель является обобщением классической модели Дьяконова-Шура на случай перпендикуляр-

ного магнитного поля. В полученной зависимости фотоотклика от магнитного поля наиболее важными представляются следующие две особенности: резонансный пик при полях, соответствующих циклотронному резонансу, который тем выраженнее, чем выше подвижность электронов в канале, и наличие осцилляций, сходных с осцилляциями проводимости Шубникова-де Гааза. С практической точки зрения эти результаты привлекательны тем, что в случае полевых транзисторов с достаточно высокой подвижностью приложенное магнитное поле позволит создать селективные и перестраиваемые в широком диапазоне частот детекторы, чувствительность которых будет более чем на порядок выше, чем в отсутствие магнитного поля. Кроме того, магнитное поле дает как возможность наблюдения новых эффектов, обусловленных изменением характера взаимодействия электронной плазмы с электромагнитным излучением, так и возможность управляемого воздействия на свойства электронной плазмы в канале транзистора. Это также позволяет более детально изучить механизмы детектирования. Поэтому одна из частей данной работы посвящена изучению влияния перпендикулярного магнитного поля на фотоотклик полевого транзистора.

Еще одна часть диссертационной работы заключалась в создании перестраиваемого источника излучения ТГц диапазона. В настоящее время в ТГц области существует ряд источников излучения. В низкочастотной части спектра средствами микроэлектроники, использующей в качестве источников диоды Ганна и лавино-пролетные диоды с последующим умножением частоты, удается получить дискретный набор частот до 1-1,2 ТГц. Лампы обратной волны (ЛОВ) обеспечивают непрерывную перестройку частоты от 0,1 до 1,5 ТГц [12]. В более высокочастотной области спектра созданы квантовые каскадные лазеры, излучающие в диапазоне от примерно 1,6 ТГц и выше [13, 14], хотя мощность излучения в области 1,6 – 2,5 ТГц все еще мала по сравнению с более высокими частотами. Кроме того, ТГц область закрывается большим набором дискретных частот, генерируемых громоздкими и достаточно сложными в эксплуатации газовыми лазерами [15, 16], а также непрерывно перестраиваемым излучением лазеров на свободных электронах [17], которые, к сожалению, имеют ограниченный спектр задач из-за своих гигантских размеров.

Среди всего набора компактными непрерывно перестраиваемыми в широком диапазоне источниками ТГц излучения являются лишь ЛОВ, закрывающие

только низкочастотную часть спектра. Создание прибора, дающего непрерывно перестраиваемое узкополосное излучение в области частот более 1,5 ТГц, является весьма актуальной задачей, например, для спектральных исследований веществ. В качестве активной среды для такого источника можно использовать р-Ge в сильных скрещенных электрическом и магнитном полях, в котором реализуются два типа генерации излучения: на межподзонных переходах дырок и на циклотронных переходах легких дырок. Первый тип характеризуется высокой интегральной мощностью и многомодовым спектром излучения, существенное изменение частоты излучения при этом возможно лишь с помощью набора внешних резонаторов, усиливающих те или иные моды, что существенно упрощает задачу конструирования непрерывно перестраиваемого лазера на этом типе переходов. Другой тип генерации излучения, основанный на циклотронных переходах легких дырок, дает узкую линию излучения, частота которой плавно меняется с приложенным магнитным полем и перекрывает необходимый диапазон частот (1,2 – 2,8 ТГц). Именно этот режим генерации р-Ge был выбран в данной работе для изготовления перестраиваемого лазера ТГц диапазона и создания на его основе ТГц спектрометра.

Цели работы:

1. Исследование закономерностей явления терагерцового фотоотклика в полевом транзисторе в зависимости от напряжения на затворе, температуры и параметров двумерного электронного газа высокой плотности (электрон-электронное рассеяние является преобладающим) и сопоставление этого явления с основными выводами гидродинамической модели Дьяконова-Шура.

2. Исследование закономерностей явления терагерцового фотоотклика в полевом транзисторе при низких температурах в квантующих магнитных полях. Исследование особенностей магнетосопротивления, установление связи между нерезонансным терагерцовым фотооткликом и магнетосопротивлением канала полевого транзистора, сопоставление характера этой связи с теоретической моделью.

3. Исследование генерации терагерцового излучения на циклотронных переходах в дырочном германии, разработка и создание лазерного спектрометра терагерцового диапазона на основе перестраиваемого р-Ge лазера для спектро-

скопии газов и твердых тел.

Научная новизна

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

1. Впервые экспериментально подтверждена связь между нерезонансным терагерцовым фотооткликом, ΔU , и проводимостью канала полевого транзистора, σ , определяемая соотношением $\Delta U \sim d\text{Ln}(\sigma)/dn$, где n – концентрация электронов в канале, следующим из гидродинамической модели Дьяконова-Шура. Показано, что это соотношение имеет универсальный характер и не зависит от конструктивных особенностей транзистора и внешних факторов, влияющих на электропроводность (температура, магнитное поле).

2. Впервые экспериментально установлена связь между осцилляциями магнетосопротивления и осциллирующей зависимостью нерезонансного терагерцового фотоотклика полевого транзистора от магнитного поля.

3. Проведено сопоставление результатов экспериментальных исследований нерезонансного терагерцового фотоотклика полевого транзистора в магнитном поле, полученных в настоящей работе, с теоретической моделью Лифшиц-Дьяконова. В результате было показано, что экспериментально наблюдаемое соотношение между осцилляциями магнетосопротивления и фотоотклика (совпадение периодов, наличие сдвига фаз на $\pi/2$) полностью соответствует предсказаниям теории. Однако предсказанный моделью Лифшиц-Дьяконова максимум фотоотклика вблизи циклотронного поля экспериментально не наблюдается, что указывает на необходимость дальнейшего развития данной теоретической модели.

Научная и практическая значимость работы

В работе впервые экспериментально показано, что сигнал нерезонансного терагерцового фотоотклика полевого транзистора однозначно связан с электропроводностью его канала. Это соотношение носит универсальный характер и не зависит от конструктивных особенностей транзистора и внешних факторов, влияющих на электропроводность (температура, магнитное поле).

В работе проведена экспериментальная проверка теории Лифшиц-

Дьяконова нерезонансного детектирования терагерцового излучения полевыми транзисторами в магнитном поле. В результате проверки было показано, что данная теоретическая модель верно описывает влияние эффекта Шубникова-де Гааза на фотоотклик и связь сигнала детектирования и электропроводности канала. При этом было выявлено расхождение, заключающееся в отсутствии теоретически предсказанного пика максимума фотоотклика как функции магнитного поля, обусловленного влиянием эффекта циклотронного резонанса. Как было показано в работе, данное расхождение указывает на необходимость дальнейшего развития теоретической модели Лифшиц-Дьяконова.

В работе изготовлен циклотронный p-Ge лазер с частотой излучения, плавно перестраиваемой в области 1,2 – 2,8 ТГц, на основе которого был разработан и создан лазерный спектрометр терагерцового диапазона.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально показано, что сигнал нерезонансного терагерцового фотоотклика полевого транзистора формируется именно в канале транзистора.
2. Сигнал нерезонансного терагерцового фотоотклика полевого транзистора однозначно связан с электропроводностью его канала. Это соотношение носит универсальный характер и не зависит от конструктивных особенностей транзистора и внешних факторов, влияющих на электропроводность (температура, магнитное поле).

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации докладывались на 35ой международной конференции «Инфракрасные миллиметровые и терагерцовые волны» (IRMMW-THz, 2010, Рим, Италия), Европейском семинаре GDR-E THz school (2007, Бомбанн, Франция), Международном семинаре GDR-I Workshop (2009, Париж, Франция), а также на семинарах Отделения физики твердого тела ФИАН.

Публикации

По теме диссертации опубликованы 9 печатных работ, в том числе 4 статьи в научных журналах, 4 публикации в сборниках тезисов докладов и трудов

конференций и симпозиумов, а также 1 патент.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, пяти Глав и Заключения. Объем диссертации составляет 135 страниц, включая 86 рисунков и 1 таблицу. Список цитированной литературы составляет 58 наименований, список работ автора по теме диссертации – 9 наименований.

Содержание работы

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

В **Главе 1** дан обзор литературы по вопросам, рассматриваемым в диссертации. Первый параграф **Главы 1** посвящен генерации терагерцового (ТГц) излучения на горячих носителях заряда в p-Ge. Представлены два возможных механизма генерации в скрещенных электрическом и магнитном полях: на межподзонных дырочных переходах [18-23] и на переходах между уровнями Ландау подзоны легких дырок [24-28]. Показано, что для возникновения как межподзонной, так и циклотронной (между уровнями Ландау подзоны легких дырок) генерации ключевую роль играют процессы рассеяния дырок на оптических фонах, акустических фонах и примесях [29]. Благодаря разнице в эффективных массах дырок в легкой и тяжелой подзонах, при определенных значениях приложенных электрического и магнитного полей, становится возможным создание ловушки исключительно в легкой подзоне, что приводит к эффективному накоплению легких дырок, в то время как тяжелые дырки быстро рассеиваются на оптических фонах [30]. Возникающая в результате инверсия населенностей легкой и тяжелой подзон приводит к межподзонной генерации терагерцового излучения. Циклотронная же генерация требует также наличие следующих двух условий. Первое – это инверсия населенностей уровней Ландау легкой подзоны, которая возникает за счет сильного взаимодействия нижних уровней с тяжелой подзоной, приводящего к оттоку легких дырок [31, 32]. Поскольку интенсивность взаимодействия резко падает с увеличением номера уровня Ландау, возникает инверсия населенностей в подзоне легких дырок. Однако за счет взаимодействия с тяжелой подзоной уменьшается эффективность накопления дырок в

легкой подзоне, в результате чего пропадает межподзонная генерация. Вторым условием циклотронной генерации является неэквидистантность уровней Ландау легкой подзоны, которая также возникает за счет взаимодействия нижних уровней с тяжелой подзоной, что приводит к некоторому увеличению энергии этих уровней [24, 33, 34].

Второй параграф **Главы 1** посвящен детектированию ТГц излучения короткоканальными полевыми транзисторами. Здесь освещены основные теоретические и экспериментальные результаты исследований данного явления. Подробно представлена гидродинамическая модель Дьяконова-Шура [4, 5], являющаяся базовой теорией детектирования ТГц излучения. В данной модели канал транзистора представляется в виде электронной жидкости, в которой под действием падающего высокочастотного излучения происходит возбуждение плазменных волн. В результате, в силу нелинейности плазмы по отношению к внешнему переменному электрическому полю, это приводит к возникновению постоянного напряжения между стоком и истоком транзистора, которое называется фотооткликом. Из теории Дьяконова-Шура следует, что в зависимости от параметров полевой транзистор может работать как резонансный или широкополосный детектор. В первом случае, когда процессы затухания слабы и канал транзистора достаточно короткий, возникает стоячая волна, и транзистор ведет себя как резонатор для плазменных волн. Во втором случае возникшее на одном конце канала возбуждение электронной плазмы затухает, прежде чем достигнуть другого конца, и фотоотклик транзистора слабо зависит от частоты падающего излучения. Оба предсказанных режима детектирования наблюдались экспериментально [6, 7, 10, 35, 36].

В третьем параграфе **Главы 1** представлена теоретическая модель Лифшиц-Дьяконова детектирования ТГц излучения короткоканальным полевым транзистором, помещенным в магнитном поле [11]. Данная модель является обобщением теории Дьяконова-Шура и рассматривает только нерезонансный режим детектирования. В качестве основного результата, данная теория предсказывает наличие двух ярких эффектов в зависимости фотоотклика от магнитного поля. Первый – это максимум детектирования вблизи магнитного поля, соответствующего циклотронному резонансу. Второй – осциллирующий характер зависимости, аналогичный осцилляциям Шубникова-де Гааза.

Глава 2 диссертации посвящена экспериментальным методикам, использованным в настоящей работе для определения спектральных характеристик излучения циклотронного р-Ge лазера и для исследования детектирования ТГц излучения полевыми транзисторами в диапазоне температур 5 – 300 К и магнитных полей 0 – 15 Тл. Также, в данной главе представлены основные параметры исследованных транзисторов.

Глава 3 посвящена изучению оптимальных условий генерации и созданию перестраиваемого циклотронного лазера ТГц диапазона на основе р-Ge. В первом параграфе показано, как анизотропия эффективной массы тяжелых дырок влияет на процессы рассеяния носителей в тяжелой и легкой подзонах, в результате чего для реализации каждого из механизмов генерации (межподзонного и циклотронного) ориентация приложенных электрического и магнитного полей относительно кристаллографических осей имеет предпочтительные направления. Кроме того, для выбранной геометрии кристалла Ge величина холловского поля становится сопоставимой с величиной прикладываемого электрического поля, в следствие чего направление приложенного поля отличается на 40 – 55° от направления электрического поля внутри кристалла. В результате, в случае циклотронной генерации, наиболее предпочтительной с точки зрения ширины диапазона перестройки частоты излучения является следующая ориентация прикладываемых полей: $\vec{B} \uparrow \downarrow [110]$, $\vec{E}_{np} \perp \vec{B}$, угол между $\vec{E}_{np}$ и осью $[1\bar{1}0]$ $\varphi_{np} \approx 20^\circ$.

Во втором параграфе **Главы 3** представлен разработанный и созданный в рамках данной диссертационной работы циклотронный ТГц р-Ge лазер. В силу пробойного характера изменения проводимости кристалла Ge возникает проблема согласования импедансов кристалла и генератора импульсов высокого напряжения, которая потребовала создания специального согласованного источника, генерирующего прямоугольные импульсы длиной от 0,25 мкс до 1 мс амплитудой до 2,5 кВ. Благодаря своим геометрическим размерам, созданный р-Ge лазер не требует специального криостата для охлаждения, поскольку может быть помещен в стандартный гелиевый дьюар. Диапазон перестройки частоты излучения составляет 1,2 – 2,8 ТГц, спектральная ширина линии – 6 ГГц.

В третьем параграфе **Главы 3** продемонстрирована возможность применения циклотронного р-Ge лазера для ТГц спектроскопии. Для этого был создан спектрометр, включающий в себя р-Ge лазер, кремниевый болометр, кювету с

исследуемым газом и компьютер с программным обеспечением, позволяющим автоматическую перестройку с заданной скоростью частоты излучения лазера с одновременной регистрацией сигнала пропускания образца. В качестве демонстрации работы прибора был измерен спектр атмосферных паров воды в диапазоне 1,5 – 2,4 ТГц. Сопоставление полученного спектра с литературными данными подтвердило работоспособность прибора.

В **Главе 4** представлены результаты исследований детектирования ТГц излучения различными типами короткоканальных полевых транзисторов при различных температурах в диапазоне 5 – 275 К. Основная цель данных исследований заключалась в установлении связи между нерезонансным ТГц фотооткликом и вольтамперными характеристиками (ВАХ) полевого транзистора, и сопоставлении характера этой связи с теоретической моделью.

В первом параграфе **Главы 4** приведены переходные ВАХ и зависимости фотоотклика от напряжения на затворе исследованных транзисторов, измеренные для ряда температур в диапазоне 5 – 275 К.

Второй параграф посвящен анализу экспериментальных данных. В нем приведена теоретическая модель, построенная на основе теории Дьяконова-Шура, которая показывает, что нерезонансный ТГц фотоотклик, ΔU , и электропроводность, σ , канала полевого транзистора связаны между собой соотношением [37]:

$$\Delta U = \frac{U_a^2}{4} \left[\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dU} \right]_{U=U_0} = \frac{U_a^2}{4} \frac{d(\ln \sigma)}{dU} \Big|_{U=U_0}, \quad (1)$$

где U_a – амплитуда переменного напряжения затвор-исток, наведенного падающим ТГц излучением, определяемая мощностью излучения и эффективностью антенны, $U = U_{gc}(x) - U_{th}$ – разность локального напряжения затвор-канал и напряжения отсечки, U_0 – приложенное постоянное напряжение затвор-исток. Кроме того, модель учитывает влияние конечного импеданса измерительной цепи, Z . Итоговое соотношение между измеряемыми зависимостями фотоотклика от напряжения на затворе, $\Delta U(V_g)$, и переходной ВАХ транзистора, $I_d(V_g)$, выглядит следующим образом:

$$\Delta U(V_g) = \frac{U_a^2}{4} \frac{dI_d}{dV_g} \frac{Z}{U_d + ZI_d(V_g)}, \quad (2)$$

где U_d – постоянное напряжение, приложенное между стоком и истоком транзистора при измерении его переходной ВАХ. Именно это соотношение проверялось экспериментально для диапазона температур 5 – 275 К. В результате был сделан вывод, что представленная теоретическая модель имеет экспериментальное подтверждение, а значит, в случае нерезонансного детектирования величина фотоотклика определяется эффективностью антенны и видом переходной ВАХ транзистора. Данный результат имеет важное практическое значение, поскольку он позволяет определять чувствительную способность детектора на основе простых и быстрых измерений его электронных характеристик, не прибегая к сложным и дорогостоящим прямым оптическим измерениям.

Третий параграф **Главы 4** посвящен низкотемпературным ($T < 100$ К) эффектам, наблюдавшимся в фотоотклике и переходной ВАХ одного из исследованных транзисторов (Si-MOSFET). На ВАХ этот эффект проявлялся в виде наличия минимума в области экспоненциального роста тока сток-исток с напряжением на затворе. Данный минимум становился более выраженным с понижением температуры образца, либо с понижением постоянного напряжения сток-исток. В зависимости фотоотклика от напряжения на затворе в области, соответствующей минимуму ВАХ, появлялись дополнительные максимумы, точное положение которых совпадало с областью максимальной крутизны ВАХ. Данный эффект, по-видимому, был обусловлен особенностями заполнения подзон размерного квантования по мере увеличения концентрации электронов в канале. А именно, при напряжениях на затворе, когда начинает заполняться возбужденная подзона нижней долины, определяющую роль играет межподзонное рассеяние электронов, обуславливающее уменьшение эффективной подвижности [38], а следовательно, и проводимости канала. При этом оказывается, что эффект резкого спада подвижности при начале заполнения возбужденной подзоны очень чувствителен к уширению уровней [38], т.е. к температуре образца, либо к величине постоянного напряжения сток-исток, что и наблюдалось в исследованном Si MOSFET.

Глава 5 посвящена исследованиям нерезонансного ТГц фотоотклика полевого транзистора, помещенного в постоянное магнитное поле. В первом параграфе данной главы из экспериментально полученных ВАХ и кривых магнетосопротивления рассчитаны все параметры (за исключением коэффициента уси-

ления антенны, являющегося нормировочным множителем), используемые в теории Лифшиц-Дьяконова для определения зависимости фотоотклика от магнитного поля. Во втором параграфе **Главы 5** приведены измеренные зависимости фотоотклика от (i) напряжения на затворе и (ii) как функции магнитного поля. Показано, что в отсутствие поля фотоотклик носит типичный нерезонансный характер. При включении поля, начиная с примерно 2 Тл, зависимости принимают форму осциллирующих функций как от напряжения на затворе, так и от магнитного поля. Также во втором параграфе показано, что осцилляции фотоотклика в зависимости от обратного поля периодичны, и величина периода зависит от напряжения на затворе. В третьем параграфе **Главы 5** осцилляции фотоотклика сопоставлены с осцилляциями магнетосопротивления и осцилляциями производной магнетосопротивления по напряжению на затворе, напрямую измеренной в данной работе. Показано, что периоды осцилляций совпадают во всем диапазоне напряжений на затворе, а фаза осцилляций фотоотклика отличается от фазы осцилляций магнетосопротивления на $\pi/2$ и совпадает с фазой осцилляций производной магнетосопротивления. В четвертом параграфе **Главы 5** зависимость фотоотклика от магнитного поля сравнивается с функцией, являющейся отношением производной магнетосопротивления к магнетосопротивлению – выражение, предложенное в теории Лифшиц-Дьяконова для осциллирующей части фотоотклика. Показано, что данное выражение на качественном уровне верно описывает характер осцилляций фотоотклика с магнитным полем во всей области напряжений на затворе. Пятый параграф посвящен численному моделированию фотоотклика на основе теории Лифшиц-Дьяконова и сравнению результатов моделирования с экспериментальными данными. Результаты моделирования показывают, что в условиях поставленного эксперимента доминирующим эффектом в зависимости фотоотклика от магнитного поля должен быть максимум детектирования вблизи циклотронного поля. В то время как экспериментально наблюдается противоположная картина: основным эффектом являются осцилляции фотоотклика с магнитным полем, вид которых совпадает с результатами моделирования, но при этом ожидаемый циклотронный пик в экспериментально полученной зависимости не наблюдается. В шестом параграфе **Главы 5** показано, что характер установленной в данной работе (в Главе 4) связи между нерезонансным ТГц фотооткликом и электропроводностью канала по-

левого транзистора сохраняется и в магнитном поле, тем самым продемонстрирована ее универсальность, вне зависимости от типа транзистора и внешних факторов, влияющих на его электронные свойства, таких как температура и магнитное поле. Из нее следует аналогичное соотношение между зависимостью фотоотклика от магнитного поля и магнетосопротивлением, обуславливающее наличие осцилляций фотоотклика в магнитном поле и, возможно, отсутствие каких-либо максимумов детектирования вблизи циклотронного поля, поскольку эффект циклотронного резонанса в магнетосопротивлении не проявляется. Седьмой параграф **Главы 5** посвящен влиянию постоянного тока сток-исток на магнетосопротивление полевого транзистора. В восьмом параграфе экспериментально исследовано влияние тока на зависимость фотоотклика от магнитного поля. Учет влияния тока сток-исток на данные зависимости был важен при сопоставлении осцилляций фотоотклика и магнетосопротивления. Кроме того, данные исследования являются новыми как с экспериментальной, так и с теоретической точки зрения.

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

Основные результаты работы

- Разработан и изготовлен циклотронный p-Ge лазер, частота излучения которого плавно перестраивается в диапазоне 1,2 – 2,8 ТГц, а ширина линии излучения составляет 6 ГГц.
- Экспериментально показано, что на основе изготовленного циклотронного p-Ge лазера может быть создан лазерный спектрометр терагерцового диапазона.
- Впервые экспериментально подтверждена связь между нерезонансным терагерцовым фотооткликом, ΔU , и проводимостью канала полевого транзистора, σ , определяемая соотношением $\Delta U \sim d\ln(\sigma)/dn$, где n – концентрация электронов в канале, следующим из гидродинамической модели Дьяконова-Шура. По-видимому, это соотношение имеет универсальный характер и не зависит от конструктивных особенностей транзистора и внешних факторов, влияющих на электропроводность (температура, магнитное поле).
- Впервые экспериментально установлена связь между осцилляциями

магнетосопротивления и осциллирующей зависимостью фотоотклика полевого транзистора от магнитного поля.

- Обнаруженная связь между нерезонансным терагерцовым фотооткликом полевого транзистора и электропроводностью его канала является прямым подтверждением того, что выпрямление падающего излучения происходит непосредственно в канале транзистора.
- Экспериментально наблюдаемое соотношение между осцилляциями магнетосопротивления и фотоотклика (совпадение периодов, наличие сдвига фаз на $\pi/2$) полностью соответствует предсказаниям модели Лифшиц-Дьяконова.
- Предсказанный моделью Лифшиц-Дьяконова максимум фотоотклика вблизи циклотронного поля экспериментально не наблюдается, что указывает на необходимость дальнейшего развития данной теоретической модели.

Список цитированной литературы

1. Dudovich, N. Single-pulse coherently controlled nonlinear Raman spectroscopy and microscopy / N. Dudovich, D. Oron, and Y. Silberberg // *Nature*. – 2002 – Vol.418 – P.512-514.
2. Cole, B.E. Coherent manipulation of semiconductor quantum bits with terahertz radiation / B. E. Cole, J. B. Williams, B. T. King, M. S. Sherwin and C. R. Stanley // *Nature*. – 2001 – Vol.410 – P.60-63.
3. Fitzgerald, A. J. An introduction to medical imaging with coherent terahertz radiation / A. J. Fitzgerald, E. Berry, N. N. Zinovev, G. C. Walker, M. A. Smith, and J. M. Chamberlain // *Phys. Med. Biol.* – 2002 – Vol.47 – No.21. – P.R67–R84.
4. Dyakonov, M. I. and Shur, M. S. Shallow water analogy for a ballistic field effect transistor and New mechanism of plasma wave generation by DC current / M. I. Dyakonov and M. S. Shur // *Phys. Rev. Lett.* – 1993 – Vol.71 – P.2465–2468.
5. Dyakonov, M.I. and Shur, M.S. Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid / M. I. Dyakonov and M. S. Shur // *IEEE Trans. on Electr. Dev.* – 1996 – Vol.43 – P.380-386.
6. Knap, W. Nonresonant detection of terahertz radiation in field effect transistors / W. Knap, V. Kachorovskii, Y. Deng, S. Rumyantsev, J. Q. Lu, R. Gaska, M. S. Shur, G. Simin, X. Hu, M. Asif Khan, C. A. Saylor, and L. C. Brunel // *J. Appl.*

Phys. – 2002 – Vol.91 – P.9346-9353.

7. Knap, W. Resonant detection of subterahertz and terahertz radiation by plasma waves in submicron field-effect transistors / W. Knap, Y. Deng, S. Romyantsev, M.S. Shur // *Appl. Phys. Lett.* – 2002 – Vol.81 – No.24 – P.4637-4639.

8. Knap, W. Resonant detection of subterahertz radiation by plasma waves in a submicron field-effect transistor / W. Knap, Y. Deng, S. Romyantsev, J.-Q. Lü, M. S. Shur, C. A. Saylor, L. C. Brunel // *Appl. Phys. Lett.* – 2002 – Vol.80 – P.3433-4335.

9. Teppe, F. Plasma wave resonant detection of femtosecond pulsed terahertz radiation by a nanometer field-effect transistor / F. Teppe, D. Veksler, V.Yu. Kachorovskii, A.P. Dmitriev, X. Xie, X.-C. Zhang, S. Romyantsev, W. Knap, and M.S. Shur // *Appl. Phys. Lett.* – 2005 – Vol.87 – P.022102.

10. Torres, J. Tunable plasma wave resonant detection of optical beating in high electron mobility transistor / J. Torres, P. Nouvel, A. Akwoue-Ondo, L. Chusseau, F. Teppe, A. Shchepetov, and S. Bollaert // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – Vol.89. – P.201101.

11. Lifshits, M. B. and Dyakonov, M. I. Photovoltaic effect in a gated two-dimensional electron gas in magnetic field / M. B. Lifshits and M. I. Dyakonov // *Phys. Rev. B.* – 2009. – Vol.80. – P.121304(R).

12. Gorshunov, B. Terahertz BWO-Spectroscopy / B. Gorshunov, A. Volkov, I. Spektor, A. Prokhorov, A. Mukhin, M. Dressel, S. Uchida, and A. Loid // *Int. J. IRMMW.* – 2005. – Vol.26. – P.1217.

13. Tredicucci, A. Terahertz quantum cascade lasers - first demonstration and novel concepts / A. Tredicucci, R. Köhler, L. Mahler, H.E. Beere, E.H. Linfield, and D.A. Ritchie // *Semicond. Sci. Technol.* – 2005. – Vol.20. – P.S222-S227.

14. Williams, B.S. Terahertz quantum-cascade lasers / B.S. Williams // *Nature Photonics.* – 2007. – Vol.1. – P.517-525.

15. Jacobson, S. Optically pumped far infrared lasers / S. Jacobson // *Infrared Phys.* – 1989. – Vol.29. – P.853-874.

16. Hodges, D.T. A review of advances in optically pumped FIR lasers / D.T. Hodges // *Infrared Phys.* – 1978. – Vol.18. – P.375-384.

17. Gallerano, G.P. and Biedron, S. Overview of terahertz radiation sources /

G.P. Gallerano and S. Biedron // Proceedings of the 26th International FEL Conference, Trieste, Italy. 29th of August – 3rd of September 2004. – P.216-221.

18. Воробьев, Л.Е. Обнаружение генерации ДИК-излучения горячими дырками в германии в скрещенных электрическом и магнитном полях / Л.Е. Воробьев, Ф.И. Осокин, В.И. Стафеев, В.Н. Тулупенко // Письма в ЖЭТФ. – 1982. – Т.35. – № 9. – С.360-362.

19. Андронов, А.А. Стимулированное излучение в длинноволновом ИК диапазоне на горячих дырках Ge в скрещенных электрическом и магнитном полях / А.А. Андронов, И.В. Зверев, В.А. Козлов, Ю.Н. Ноздрин, С.А. Павлов, В.Н. Шасти́н // Письма в ЖЭТФ. – 1984. – Т.40. – Вып.2. – С.69-71.

20. Bründermann, E. Double acceptor doped Ge: A new medium for inter-valence-band lasers / E. Bründermann, A. M. Linhart, L. Reichertz, and H. P. Röser O. D. Dubon, W. L. Hansen, G. Sirmain, and E. E. Haller // Appl. Phys. Lett. – 1996 – Vol.68 – P.3075-3077.

21. Reichertz, L.A. Stimulated far-infrared emission from combined cyclotron resonances in germanium / L.A. Reichertz, O.D. Dubon, G. Sirmain, E. Bründermann, W.L. Hansen, D.R. Chamberlin, A.M. Linhart, H.P. Röser, E.E. Haller // Phys. Rev. B – 1997 – Vol.56 – No.19 – P.12069-12072.

22. Hiromoto, N. Terahertz Wave p-type Ge Laser / N. Hiromoto // Rev. Laser Eng. – 1998 – Vol.26 – No.7 – P.541-545.

23. Muravjov, A.V. Far-infrared p-Ge laser with variable length cavity / A.V. Muravjov, E.W. Nelson, R.E. Peale, V.N. Shastin and C.J. Fredricksen // Infrared Phys. Technol. – 2003 – Vol.44 – P.75–78.

24. Гавриленко, В.И. Циклотронный резонанс горячих дырок Ge в сильном постоянном электрическом поле $E \perp H$ / В.И. Гавриленко, Е.П. Додин, З.Ф. Красильник // В кн.: Инвертированные распределения горячих электронов в полупроводниках. Горький: ИПФ АН СССР – 1983 – С.141-171.

25. Mityagin, Yu.A. Anticrossing of Landau levels and stimulated emission of hot holes in germanium in the cyclotron-transition region / Yu.A. Mityagin, V.N. Murzin, S.A. Stoklitsky and I.E. Trofimov // JETP Letters – 1987 – Vol.46 – P.144-147.

26. Иванов, Ю.Л. Спонтанное и стимулированное излучение легких дырок германия в субмиллиметровой области / Ю.Л. Иванов // В кн.: Инвертиро-

ванные распределения горячих электронов в полупроводниках. Горький: ИПФ АН СССР – 1983 – С.172-177.

27. Васильев, Ю.Б. и Иванов, Ю.Л. Частота стимулированного излучения при переходах через уровни Ландау легких дырок в германии / Ю.Б. Васильев и Ю.Л. Иванов // Письма в ЖЭТФ – 1984 – Т.10 – Вып.15 – С.940-953.

28. Mityagin, Yu.A. Quantum effects in submillimeter hot hole semiconductor lasers/ Yu.A. Mityagin, V.N. Murzin, S.A. Stoklitsky. // Opt. Quant. Electron. – 1991 – Vol.23 – P.S287-S306.

29. Shastin, V.N. Hot hole inter-sub-band transition p-Ge FIR laser / V.N. Shastin // Opt. Quant. Electron. – 1991 – Vol.23 – P.S111-S131.

30. Андронов, А.А. Об усилении далекого инфракрасного излучения в германии при инверсии населенностей «горячих» дырок / А.А. Андронов, В.А. Козлов, Л.С. Мазов, В.Н. Шасти́н // Письма в ЖЭТФ – 1979 – Т.30 – Вып.9 – С.585-589.

31. Козлов, В.А. Инверсия горячих носителей по уровням Ландау / В.А. Козлов, Л.С. Мазов, И.М. Нефедов, М.Р. Заболотских // Письма в ЖЭТФ – 1983 – Т.37 – Вып.3 – С.142-144.

32. Дьяконов, М.П. и Перель, В.И. Туннельные переходы в валентной зоне германия и инверсия заселенностей уровней Ландау легких дырок / М.П. Дьяконов и В.И. Перель // ЖЭТФ – 1987 – Т.92 – Вып.1 – С.350-357.

33. Lax, V. Cyclotron resonance and impurity levels in semiconductors / V. Lax // In: Quantum Electronics. N.Y: Columb.Univ.Press – 1960 – P.428-447.

34. Wolff, P.A. Proposal for a cyclotron resonance maser in InSb / P.A. Wolff // N.Y.: Physics – 1964 – Vol.1 – No.3 – P.147-157.

35. El Fatimy, A. Resonant and voltage-tunable terahertz detection in InGaAs/InP nanometer transistors / A. El Fatimy, F. Teppe, N. Dyakonova, W. Knap, D. Seliuta, G. Valusis, A. Shchepetov, Y. Roelens, S. Bollaert, A. Cappy, S. Rumyantsev // Appl. Phys. Lett. – 2006 – Vol.89 – P.131926-1-131926-3.

36. Boubanga-Tombet, S. Current driven resonant plasma wave detection of terahertz radiation: Toward the Dyakonov–Shur instability / S. Boubanga-Tombet, F. Teppe, D. Coquillat, S. Nadar, N. Dyakonova, H. Videlier, W. Knap, A. Shchepetov, C. Gardès, Y. Roelens, S. Bollaert, D. Seliuta, R. Vadoklis, and G. Valušis // Appl. Phys. Lett. – 2008 – Vol.92 – P.212101-1-212101-3.

37. Sakowicz, M. Terahertz responsivity of field effect transistors versus their static channel conductivity and loading effects / M. Sakowicz, M. B. Lifshits, O. A. Klimenko, F. Schuster, D. Coquillat, F. Teppe and W. Knap // J. Appl. Phys. – 2011 – Vol.110 – P.054512-1-054512-6.

38. Андо, Т. Электронные свойства двумерных систем / Т. Андо, А. Фаулер, Ф. Стерн // Москва: «Мир». – 1985. – Гл.4. – С.141-147.

Публикации автора по теме диссертации

1. Klimenko, O.A. Tuneable THz laser using p-doped germanium as a source of radiation / O.A. Klimenko, N.V. Dyakonova, W. Knap, S.A. Savinov, Yu.A. Mityagin, V.N. Murzin. // GDR-E THz school – Bombannes, France – 1-2nd of June 2007.

2. Klimenko, O.A. Terahertz wide range tunable cyclotron resonance p-Ge laser / O.A. Klimenko, N.V. Dyakonova, W. Knap, S.A. Savinov, Yu.A. Mityagin, V.N. Murzin. // GDR-I Workshop – Paris, France – 27-28 Sept. 2010.

3. Klimenko, O.A. Terahertz Detection by InGaAs HEMTs in Quantizing Magnetic Fields: relation between magnetoresistance and photovoltaic response / O.A. Klimenko, Y.A. Mityagin, H. Videlier, S. Boubanga-Tombet, F. Teppe, N.V. Dyakonova, S.H. Nadar, S.A. Savinov, C. Consejo, V.N. Murzin, W. Knap // Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) 2010 35th International Conference – Rome, Italy – 5-10 Sept. 2010.

4. Klimenko, O.A. Terahertz spectroscopy based on tunable p-Ge laser operating in the cyclotron resonance mode / O.A. Klimenko, Y.A. Mityagin, S.A. Savinov, V.N. Murzin, N.V. Dyakonova, P. Solignac, W. Knap // Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) 2010 35th International Conference – Rome, Italy – 5-10 Sept. 2010.

5. Klimenko, O.A. Terahertz Response of InGaAs Field Effect Transistors in Quantizing Magnetic Fields / O.A. Klimenko, Yu.A. Mityagin, H. Videlier, F. Teppe, N.V. Dyakonova, C. Consejo, S. Bollaert, V.N. Murzin, and W. Knap. // Appl. Phys. Lett. – 2010 – Vol.97 – P.0022111-1-0022111-3.

6. Klimenko, O.A. Terahertz wide range tunable cyclotron resonance p-Ge laser / O.A. Klimenko, Yu.A. Mityagin, S.A. Savinov, V.N. Murzin, N.V. Dyakonova, P. Solignac and W. Knap. // J. Phys. Conf. – 2009 – Vol.193 – P.012064-1-012064-4.

7. Knap, W. Plasma excitations in field effect transistors for terahertz detection and emission / W. Knap, D. Coquillat, N. Dyakonova, F. Teppe, O. Klimenko, H. Videlier, S. Nadar, J. Łusakowski, G. Valusis, F. Schuster, B. Giffard, T. Skotnicki, C. Gaquière and A. El Fatimy // C.R.Physique – 2010 – Vol.11 – No.7-8 – P. 433-443.

8. Sakowicz, M. Terahertz responsivity of field effect transistors versus their static channel conductivity and loading effects / M. Sakowicz, M. B. Lifshits, O. A. Klimenko, F. Schuster, D. Coquillat, F. Teppe and W. Knap // J. Appl. Phys. – 2011 – Vol.110 – P.054512-1-054512-6.

9. Knap, W. Portable terahertz cyclotron resonance p-Ge laser / W. Knap, O. Klimenko, Yu. A. Mityagin, P. Solignac. // application for a patent in France N°1153384 has been submitted 19.04.2011.