

На правах рукописи

Маремьянин Кирилл Владимирович

**ГЕНЕРАЦИЯ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ A_3B_5**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород
2007

Работа выполнена в Институте физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН)

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Ежевский Александр
Александрович
кандидат физико-математических наук
Митягин Юрий Алексеевич

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный по-
литехнический университет

Защита состоится 11 октября 2007 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 “10” сентября 2007 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Гайкович К.П.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Освоение терагерцового диапазона частот (10 ТГц - 30ТГц) – одно из наиболее “горячих” и бурно развивающихся направлений современной физики. Электромагнитные волны этого диапазона отражаются металлами, но они проникают через пластмассы, бумагу, сухую древесину и любые мутные среды и мелкодисперсные материалы из-за резкого подавления рэлеевского рассеяния ($\propto 1/\lambda^4$). В терагерцовом диапазоне лежат вращательные спектры многих органических молекул, включая колебания биологически важных коллективных мод ДНК и белков, а также фоновые резонансы кристаллических решеток, что позволяет развивать новые методы спектроскопии биологических и полупроводниковых структур [1, 2]. В отличие от рентгена терагерцовое излучение не опасно, поскольку не производит ионизацию среды и повреждение биомолекул. Перспективны такие применения терагерцового излучения, как беспроводная коммуникация на коротких расстояниях, разработка систем «терапии» [3] и др.

Наиболее сложной проблемой является разработка эффективных методов генерации когерентного терагерцового излучения. В этом диапазоне неприменимы хорошо разработанные физические принципы генерации оптического и СВЧ излучений [4 - 5]. В целом, доступные источники когерентного терагерцового излучения являются маломощными (от нано- до микроватт, иногда — до ватт), плохо перестраиваемыми и фактически покрывающими лишь отдельные узкие полосы частот. В этом отношении большие надежды возлагаются на полупроводниковые источники, которые хорошо зарекомендовали себя в оптическом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах и в последние годы стали активно развиваться также в терагерцовом (дальнем ИК) диапазоне. Данная работа посвящена именно этому направлению полупроводниковой электроники, потенциально ведущему к созданию компактных, эффективных и дешевых генераторов излучения с длиной волны от десятка до сотен микрон.

Для детектирования терагерцового излучения на сегодняшний день в основном применяются широкополосные приемники излучения: болометры, пироэлектрические датчики, диоды Шоттки и фотопроводящие детекторы. Использование же селективных и перестраиваемых детекторов при

спектральном анализе позволяет отказаться от дифракционных решеток или механически перестраиваемых интерферометров. Таким селективным детектором может быть полевой транзистор с двумерным электронным газом в канале, перестраиваемый приложенным к затвору напряжением. Исследованию детектирования терагерцового излучения в таких нанометровых транзисторах уделено значительное внимание в данной работе.

Цели работы

- наблюдение генерации излучения на разностной частоте в двухчастотных инжекционных полупроводниковых лазерах InGaAs/GaAs/InGaP;
- обнаружение резонансного детектирования терагерцового излучения в двумерной электронной плазме в нанометровых полевых транзисторах GaN/AlGaN;
- демонстрация перестройки резонансного отклика в терагерцового диапазоне в нанометровых полевых транзисторах GaAs/AlGaAs с двумерной электронной плазмой в канале;
- исследование спектров терагерцового излучения из нанометровых полевых транзисторов GaAs/AlGaAs;
- исследование спектров излучения из квантовых каскадных структур GaAs/AlGaAs с металлическим волноводом и дифракционной решеткой для вывода излучения.

Научная новизна

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

1. Получена двухчастотная генерация на основной и возбужденной поперечной моде волновода в инжекционном полупроводниковом лазере с квантовыми ямами в ближнем ИК диапазоне, что необходимо для выполнения условия фазового синхронизма для генерации излучения разностной частоты, и продемонстрирована возможность управления интенсивностями линий током накачки. В лазерной структуре InGaAs/GaAs/InGaP с тремя квантовыми ямами, демонстрирующей двухчастотную генерацию на основной и возбужденной модах волновода с разностью энергий квантов 50

мэВ обнаружен сигнал в среднем ИК диапазоне, связываемый с генерацией излучения на разностной частоте.

2. Обнаружено резонансное детектирование излучения ($f \sim 0.6$ ТГц) в полевом нанометровом транзисторе на основе GaN/AlGaN на частоте плазменных колебаний в подзатворной плазме. В транзисторах на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs впервые продемонстрирована перестройка частоты резонансного отклика изменением напряжения на затворе.

3. Обнаружено возникновение узкополосного излучения ($f = 1,25$ ТГц) в полевых транзисторах на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs, возникающее на участке вольт-амперной характеристики (ВАХ) транзистора, соответствующей насыщению и последующему срыву тока, связываемое с возникновением сверхвысокочастотного эффекта Ганна вследствие образования бегущего домена в нанометровом промежутке затвор-сток.

4. В квантовых каскадных структурах GaAs/AlGaAs, содержащих две квантовые ямы в активной области и две в инжекторе в каждом каскаде, на статической ВАХ наблюдались воспроизводимые множественные участки отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП). На трех участках ВАХ обнаружено возникновение пороговым образом интенсивного терагерцового излучения мощностью до 2 нВт. Спектральными исследованиями показано, что излучение является широкополосным со спектральными особенностями, соответствующими рассчитанным значениям энергий межуровневых переходов в квантовых ямах. Обнаруженное излучение связывается с суперлюминесценцией при усилении спонтанного излучения, возникающего при резонансной накачке уровней в ямах.

Научная и практическая значимость работы

Научная и практическая значимость полученных результатов заключается в демонстрации одновременной генерации на двух частотах в полупроводниковом инжекционном лазере с тремя квантовыми ямами InGaAs/GaAs/InGaP, как на основных, так и на возбужденных поперечных модах волновода, возможности управления интенсивностями линий током накачки в таких двухчастотных лазерах и обнаружении сигнала, связываемого с генерацией разностной гармоникой, что открывает возможности для создания компактных источников излучения среднего и дальнего ИК диа-

пазонов, работающих при комнатной температуре. Обнаруженный эффект перестройки резонансной частоты фотоотклика в терагерцовом диапазоне в нанометровых полевых транзисторах с двумерным электронным газом может быть использован для создания селективных перестраиваемых напряжением на затворе приемников терагерцового излучения. Обнаружение узкополосного излучения в полевом транзисторе GaAs/AlGaAs открывает возможности создания миниатюрных источников терагерцового излучения. Обнаружение возникающего пороговым образом в квантовых каскадных структурах GaAs/AlGaAs интенсивного терагерцового излучения, связываемого с усилением спонтанного излучения при резонансной накачке уровней в квантовых ямах в области ОДП структуры, будет способствовать развитию представлений о физических процессах в таких структурах и созданию перестраиваемых напряжением квантовых каскадных лазеров терагерцового диапазона.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В инжекционных полупроводниковых лазерах InGaAs/GaAs/InGaP с тремя квантовыми ямами различного состава в активной области возможна одновременная генерация в двух частотных полосах на основной и возбужденной модах волновода, что создает условия для генерации излучения на разностной частоте; относительной интенсивностью линий можно управлять током накачки.
2. В спектре фото-ЭДС нанометрового полевого транзистора с двумерным электронным газом с высокой подвижностью наблюдается резонансный отклик на частоте плазменных колебаний в подзатворной плазме.
3. В полевом нанометровом транзисторе GaAs/AlGaAs в области насыщения ВАХ возможно развитие ганновской неустойчивости, сопровождающиеся узкополосным терагерцовым излучением.
4. В квантовых каскадных структурах в области отрицательной дифференциальной проводимости возможно возникновение усиления спонтанного излучения на межуровневых переходах, связанного с резонансной накачкой уровней в ямах.

Личный вклад автора

- Равнозначный (совместно с С.В.Морозовым) в подготовку и проведение экспериментов по исследованию генерации излучения на разностной частоте в двухчастотных инжекционных полупроводниковых лазерах In-GaAs/GaAs/InGaP, обработку и интерпретацию их результатов [A1, A2, A4 - A16, A18, A20, A21, A23 - A25].
- Равнозначный (совместно с С.В.Морозовым) в проведение исследования резонансного детектирования ТГц излучения в двумерной электронной плазме в нанометровых полевых транзисторах GaN/AlGaN и GaAs/AlGaAs, обработку и интерпретацию их результатов [A3, A17, A19, A22, A28, A31].
- Определяющий в подготовку и проведение измерений спектров ТГц излучения из нанометровых полевых транзисторов GaAs/AlGaAs, обработку и интерпретацию их результатов [A27 – A29, A31].
- Основной в подготовку и проведение исследования спектров излучения из квантовых каскадных структур GaAs/AlGaAs с металлическим волноводом и дифракционной решеткой для вывода излучения и интерпретацию их результатов [A26, A30].

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации докладывались на 12 - 15 Международных симпозиумах «Наноструктуры: физика и технология» (2004 – 2006, Санкт-Петербург; 2007, Новосибирск), Всероссийском совещании «Нанофотоника» (2004, Нижний Новгород), 6 - 8 Российских конференциях по физике полупроводников (2003, Санкт-Петербург; 2005, Звенигород; 2007, Екатеринбург), 6-ой Международной конференции по оптоэлектронным материалам среднего ИК диапазона (2004, Санкт-Петербург), 12-м Международном симпозиуме по сверхбыстрым явлениям в полупроводниках (2004, Вильнюс, Литва), 12-й Международной конференции по узкозонным полупроводникам (2005, Тулуза, Франция), Международной конференции по когерентному контролю фундаментальных процессов в оптике и рентгеновской оптике (2006, Нижний Новгород), 6-ой Международной научно-технической конференции «Квантовая электроника» (2006, Минск, Беларусь), Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (2007, Нижний Новгород), Всероссийских симпозиумах

«Нанозфизика и нанозлектроника» (2005-2007, Нижний Новгород), а также на семинарах ИФМ РАН и ННГУ.

Публикации

По теме диссертации опубликованы 31 печатная работа, в том числе 6 статей в научных журналах и 25 публикаций в сборниках тезисов докладов и трудов конференций, симпозиумов и совещаний.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения и Приложения. Объём диссертации составляет 171 страница, включая 83 рисунка и 3 таблицы. Список цитированной литературы включает 180 наименований, список работ автора по теме диссертации - 31 наименование.

Основное 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 раздел **Главы 1** посвящен исследованию возможности генерации электромагнитного излучения среднего и дальнего ИК диапазонов при смешении оптических мод в полупроводниковых лазерных структурах A_3B_5 за счет квадратичной решеточной нелинейности. Рассмотрены различные механизмы оптической нелинейности в полупроводниках A_3B_5 и, в частности, решеточная нелинейность восприимчивости второго порядка полярного полупроводника GaAs. Приведены различные способы выполнения условия фазового синхронизма (равенство фазовых скоростей волны нелинейной поляризации и разностной моды волновода). Для лазерных образцов, рассмотренных в данной работе, этот способ состоит в увеличении скорости нелинейной поляризации путем использования для накачки поперечных мод разного порядка. Альтернативный способ представляет собой замедление фазовой скорости (увеличении эффективного коэффициента преломления) разностной моды волновода с помощью плазменного волновода, внедренной в волновод металлической гофрированной структурой или путем нанесения на поверхность волновода металлической

дифракционной решетки, через которую выводится волна на разностной частоте.

Второй раздел **Главы 1** посвящен обзору теории плазменной неустойчивости Дьяконова-Шура в канале баллистического полевого транзистора [6]. Кратко описана модель резонансного детектирования электромагнитного излучения в полевом транзисторе. В таком транзисторе поведение электронного газа может быть описано с помощью гидродинамических уравнений “мелкой воды”, где потенциал между затвором и каналом играет роль уровня воды; плазменные волны соответствуют волнам на поверхности воды. При несимметричных граничных условиях с фиксированным напряжением на истоке и током, поддерживаемым постоянным на стоковом конце, стационарное состояние является неустойчивым, что приводит к генерации плазменных волн. Вследствие большой скорости плазменных волн и малых размеров полевого транзистора, частота плазменных колебаний находится в терагерцовом диапазоне. Сопутствующие колебания дипольного момента, созданного зарядами в канале и на затворе, могут стать причиной излучения электромагнитных волн терагерцового диапазона.

Поскольку возбуждение плазменных колебаний носит резонансный характер, а частота генерации зависит лишь от величины напряжения затвористок U_{gs} , на основе баллистического транзистора было предложено создание перестраиваемых резонансных генератора и детектора излучения, смесителя и умножителя частоты.

Приводятся также краткие сведения об эффекте Ганна в GaAs.

В третьем разделе **Главы 1** описан принцип построения униполярного квантового каскадного лазера (ККЛ), а также различные конструкции активных областей, описанные в литературе. В ККЛ терагерцового диапазона наиболее эффективно показали себя два вида дизайна, которые можно качественно разделить, как ККЛ с активной областью из сверхрешетки с постепенно изменяющимся периодом связанных ям (“chirped superlattice”) [7] и схема, содержащая в активной зоне две квантовые ямы, с инверсией населенности, основанной на резонансе с оптическим фоном [8].

Дизайн квантовых каскадных структур, исследуемых в данной работе, близок к конструкции “chirped superlattice”, в которой достижению инверсной населенности способствует быстрое опустошение нижнего рабочего уровня в активной квантовой яме за счет переходов между близко распо-

ложенными по энергии уровнями в соседних квантовых ямах уменьшающейся толщины на основной уровень инжектора, откуда они инжектируются на второй верхний рабочий уровень в активной квантовой яме.

В **Главе 2** представлены результаты исследования нелинейных эффектов в двухчастотных полупроводниковых лазерах InGaAs/GaAs/InGaP.

В работе [9] для лазера с диэлектрическим волноводом на основе гетероструктуры InGaAs/GaAs/InGaP была предложена конструкция, позволяющая осуществлять генерацию двух частот в ближнем ИК диапазоне на основной и возбужденной модах волновода и обеспечивающая выполнение условия фазового синхронизма. Указанная конструкция была реализована в гетеролазерах, исследовавшихся в настоящей работе. Приведена методика исследования спектров лазерного излучения в ближнем ИК диапазоне и зависимости интенсивности линий генерации от тока накачки.

В работе получена одновременная генерация стимулированного излучения в двух частотных полосах в полупроводниковых лазерах с тремя квантовыми ямами. Показано, что могут возбуждаться как основные, так и возбужденные поперечные TE моды волновода. С целью выяснения оптимальных условий двухчастотной генерации лазеров, исследованы зависимости мощности генерации на различных частотах от тока накачки.

Во втором разделе **Главы 2** представлена конструкция «двухчипового» лазера, которая по сравнению с монолитным двухчастотным лазерным диодом имеет ряд преимуществ, связанных с отдельной накачкой каждого из двух одночастотных лазеров, а также рассмотрена методика исследования спектров лазерного излучения из таких образцов в ближнем ИК и видимом диапазонах частот. Приведены результаты исследования генерации вторых и суммарной гармоник в «двухчиповых» лазерах. Существенная интенсивность излучения суммарной частоты (порядка интенсивности вторых гармоник) указывает на эффективность нелинейного взаимодействия двух мод ближнего ИК диапазона внутри лазерного резонатора.

Третий раздел **Главы 2** посвящен наблюдению излучения среднего ИК диапазона в двухчастотных лазерах InGaAs/GaAs/InGaP. В лазере с разностью между полосами излучения 50 мэВ, генерирующем на основной и возбужденной модах волновода, зарегистрирован сигнал примесным фотоприемником Si:B (полоса чувствительности от ~10 до 30 мкм), связывае-

мый с генерацией разностной гармоник. Ближнее ИК излучение основных мод лазерной генерации при этом отсекалось фильтрами Ge и InSb.

К тематике этой главы относится и **Приложение**, в котором приведены результаты измерений спектров излучения в среднем ИК диапазоне для «двухчипового» лазера InGaAs/GaAs/InGaP, которые были получены совсем недавно и еще не опубликованы. В ранее изучавшихся «двухчиповых» лазерах оба одночастотных лазера излучали на основной моде волновода, и условие фазового синхронизма. В исследуемых здесь образцах передний (коротковолновый) лазер излучал на возбужденной моде волновода, что обеспечивало выполнение условия фазового синхронизма для разностной частоты. В среднем ИК диапазоне с помощью решеточного монохроматора в спектре излучения был обнаружен пик, соответствующий рассчитанной разностной частоте. При выключении одного из лазеров сигнал пропадал, что говорит в пользу того, что причина данного сигнала является излучение на разностной частоте. Оценки мощности излучения на разностной частоте дают значение порядка 100 мкВт.

В четвертом разделе **Главы 2** приведены результаты исследования генерации вторых и суммарной гармоник в двухчастотном межзонном каскадном лазере с узким сильно легированным туннельным переходом, разделяющем две области различных квантовых ям, размещенных в одном и том же лазерном волноводе. Каждый электрон (дырка), поставляемый инжекционной накачкой, дважды проходит через запрещенную зону полупроводника, испуская соответственно длинноволновые и коротковолновые фотоны в различных квантовых ямах, что позволяет решить проблему неустойчивой генерации из-за неконтролируемой конкуренции квантовых ям за носители заряда [A20]. Приведены результаты наблюдений, которые демонстрируют присутствие вторых гармоник для основных мод излучения, а также сигнала с суммарной частотой этих мод. Это является прямым доказательством возможности одновременной генерации излучения основных линий и смещения частот внутри резонатора лазера, что открывает возможность генерации в таких лазерах излучения на разностной частоте.

В **Главе 3** представлены результаты исследования детектирования и генерации терагерцового излучения в нанометровых полевых транзисторах.

Первая часть главы посвящена исследованию резонансного детектирования излучения терагерцового диапазона для двух типов нанометровых

полевых транзисторов с длиной затвора 250 нм: в транзисторе, изготовленном из селективно легированной гетероструктуры GaN/AlGaN, и в коммерчески доступном транзисторе GaAs/AlGaAs (Fujitsu) при $T = 4,2$ К. Приведен обзор работ, в которых уже наблюдалось резонансное и нерезонансное детектирование в полевых транзисторах с двумерным электронным газом.

В первом разделе **Главы 3** кратко описаны методики экспериментального исследования магнитотранспортных характеристик транзистора GaN/AlGaN и фотоЭДС транзистора в терагерцовом диапазоне в зависимости от напряжения на затворе с использованием в качестве источников излучения генераторов на основе ламп обратной волны (ЛОБ). Все измерения проводились при $T=4,2$ К.

Измерение зависимости проводимости от магнитного поля позволило определить подвижность носителей заряда в канале транзистора: $\mu \approx 3500$ см²/В·с. В результате исследования фотоотклика транзистора было обнаружено, что зависимость фотоЭДС на частоте излучения $f = 574$ ГГц от напряжения на затворе (т.е. от концентрации двумерных электронов) имеет характерный максимум при напряжении на затворе практически совпадающем с расчетным значением в рамках модели Дьяконова-Шура. Определенному из магнитотранспортных измерений значению подвижности соответствует на этой частоте значение параметра $\omega_r \tau = 1.5$. Все это позволяет заключить, что данная особенность фотоотклика связана с резонансом в подзатворной электронной плазме транзистора GaN/AlGaN.

Во втором разделе **Главы 3** приведены результаты исследования резонансного детектирования терагерцового излучения в нанометровом полевом транзисторе GaAs/AlGaAs (Fujitsu FHX06X). Резонансное детектирование терагерцового излучения в подобном транзисторе уже было продемонстрировано в работе [10], где измерения проводились на одной фиксированной частоте 600 ГГц. В данной работе для транзистора GaAs/AlGaAs был обнаружен резонансный фотоотклик при $T = 4,2$ К для 4-х различных частот излучения, при этом смещение резонансного пика с ростом частоты в область больших напряжений на затворе хорошо соответствует модели Дьяконова-Шура. Т.о. впервые продемонстрирована перестройка максимума отклика с ростом частоты в область больших напряжений на затворе. Сопоставление измеренных фотоЭДС при температурах 4,2 К и 77 К пока-

зало, что при увеличении температуры фотоотклик становится нерезонансным за счет уменьшения подвижности и, соответственно, фактора $\omega\tau$.

Третий раздел **Главы 3** посвящен исследованию генерации терагерцового излучения в нанометровых транзисторах GaAs/AlGaAs (Fujitsu FHX06X). Представлен обзор работ, посвященных исследованию генерации электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне в других короткоканальных полевых транзисторах. Приведены результаты экспериментального и теоретического исследования токовой неустойчивости в канале транзистора AlGaAs/InGaAs с такой же длиной затвора, что и в настоящей работе 250 нм, но с большим расстоянием между затвором и стоком – 2 мкм [11], где показано, что в подобных транзисторах резкий спад тока в области насыщения ВАХ связан с возникновением неустойчивости тока в канале и началом ганновских осцилляций тока.

В настоящей работе терагерцовое излучение из транзистора GaAs/AlGaAs при $T = 4,2$ К детектировалось высокочувствительным широкополосным кремниевым болометром. Для анализа спектрального состава излучения использовались перестраиваемый магнитным полем режекторный фильтр на циклотронном резонансе электронов в слаболегированном ($N \sim 10^{14}$ см⁻³) объемном GaAs. Резонансная частота фильтра перестраивалась магнитным полем с индукцией до 10 Т. Калибровка фильтра была проведена с использованием ЛОВ и квантового каскадного лазера.

В работе обнаружено, что терагерцовое излучение возникало за падающим участком на ВАХ, который связывается с развитием ганновской неустойчивости [11]. Помимо широкополосного излучения горячих носителей в спектрах были обнаружены узкие полосы излучения, возникающие пороговым образом с ростом напряжения сток-исток, которые связываются с возникновением ганновских осцилляций тока в канале транзистора вследствие образования бегущего домена в промежутке затвор-сток [12]. Высокая (~ 1 ТГц) частота ганновских осцилляций объясняется квазибаллистическим движением Γ -электронов со средней скоростью $\sim 10^8$ см/с.

Глава 4 посвящена исследованию генерации ТГц излучения в квантовых каскадных структурах GaAs/AlGaAs.

Исследованные структуры по дизайну были аналогичны изучавшимся в работе [13]. Этот дизайн близок к тому, что используется в терагерцовых

ККЛ и получившему название “chirped superlattice”. Исследовались ВАХ и терагерцовых излучение при $T = 4,2\text{К}$. Излучение регистрировалось с помощью кремниевого болометра, использовалась стандартная схема синхронного детектирования. Для исследования спектрального состава излучения использовался режекторный фильтр на циклотронном резонансе n -InSb, перестраиваемый магнитным полем.

На ВАХ наблюдались участки ОДП при приложенном напряжении $U > 3.2$ В. Для всех 4-ех исследованных образцах обнаружено пороговое возникновение терагерцового излучения вблизи $U = 3.78, 4.38, 5.15$ В. Излучение является широкополосным с особенностями на частотах, которые в основном совпадают с рассчитанными частотами межуровневых переходов. В полосе остаточных лучей GaAs наблюдаются провалы сигнала. В то же время в настоящей работе не наблюдалось спонтанное излучение на участке ВАХ до области ОДП ($U < 3\text{В}$), где в работе [13] наблюдались переходы между вторым и первым состояниями в активной квантовой яме на уровне 1 пВт, которое в нашем случае очевидно было меньше уровня шума. Сопоставление полученных результатов с данными теоретических расчетов спектров усиления/поглощения при разных значениях электрического поля в структурах позволяет связать обнаруженное излучение с суперлюминесценцией – усилением спонтанного излучения, возникающим при установлении определенного значения электрического поля и при резонансной накачке уровней в ямах.

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

Основные результаты работы

1. Проведено экспериментальное исследование одновременной генерации на двух частотах в полупроводниковом лазере с тремя квантовыми ямами, как на основных, так и на возбужденных поперечных модах волновода. Исследованы зависимости мощности генерации на различных частотах от тока накачки. Продемонстрирована возможность управления интенсивностями линий током накачки. Обнаружена немонотонная зависимость интенсивности длинноволновой линии с ростом тока, связываемая с тем, что фотоны, излучаемые коротковолновой ямой, стимулируют рекомбинацию тех электронов в длинноволновой КЯ, энергия которых соответствует энергии

переходов из основного состояния электронов в коротковолновой КЯ. Тем самым уменьшается населенность основного состояния электронов в длинноволновой КЯ и возможно уменьшение интенсивности излучения длинноволнового пика с ростом тока.

2. В лазерной структуре с тремя квантовыми ямами в активной области, демонстрирующей двухчастотную генерацию на основной и возбужденной модах волновода с разностью между полосами излучения 50 мэВ, обнаружен сигнал в среднем ИК диапазоне (в полосе чувствительности примесного фотоприемника Si:B), связываемый с генерацией разностной гармоники.

3. Исследовано детектирование ТГц излучения ($f \sim 0.6$ ТГц) полевыми транзисторами на основе GaN/AlGaN и GaAs/AlGaAs (Fijitsu FHX06X) с длиной затвора 250 нм при $T=4,2$ К. Обнаружено, что зависимость фотоЭДС от напряжения на затворе имеет характерный максимум, соответствующий резонансному отклику в подзатворной электронной плазме транзистора. Для транзистора GaAs/AlGaAs впервые продемонстрировано смещение максимума отклика с ростом частоты в область больших напряжений на затворе, в соответствии с моделью Дьяконова-Шура.

4. Исследованы ВАХ нанометровых транзисторов GaAs/AlGaAs (Fijitsu FHX06X) при приложении напряжения между стоком и истоком и возникающее терагерцовое излучение. Излучение возникает пороговым образом при увеличении напряжения на стоке в момент срыва ВАХ, что может быть связано с возникновением эффекта Ганна. Обнаружено узкополосное излучение в области 1.25 ТГц, связываемое с ганновскими осцилляциями тока вследствие образования бегущего домена в промежутке затвор-сток.

5. Исследованы ВАХ и терагерцовое излучение в квантовых каскадных структурах GaAs/AlGaAs, содержащих две ямы в активной области и две в инжекторе в каждом каскаде. На статической ВАХ воспроизводимым образом наблюдаются множественные нерегулярные участки ОДП, связанные с установлением неоднородных распределений электрического поля в структуре. Обнаружено, что в трех областях приложенного напряжения (на горизонтальных участках ВАХ) в структуре пороговым образом возникает интенсивное терагерцовое излучение до 2 нВт.

6. С помощью перестраиваемого магнитным полем режекторного фильтра на циклотронном резонансе в *n*-InSb исследованы спектры обнаруженного излучения из каскадных структур. Показано, что излучение является широкополосным с особенностями на частотах, совпадающими с рассчитанными частотами межуровневых переходов; спектр излучения смещается в коротковолновую область при увеличении приложенного напряжения. Сопоставление полученных результатов с данными теоретических расчетов спектров усиления/поглощения при разных значениях электрического поля в структурах позволяет связать обнаруженное излучение с суперлюминесценцией – усилением спонтанного излучения, возникающим при установлении определенного значения электрического поля и при резонансной накачке уровней в ямах.

Список цитированной литературы

- [1] Smye, S. W. The interaction between terahertz radiation and biological tissue / S.W. Smye [et al.] // Phys. Med. Biol. – 2001. – Vol. 46. – P. R101-R112.
- [2] Huber, R. How many-particle interactions develop after ultrafast excitation of an electron-hole plasma / R. Huber [et al.] // Nature. – 2001. - Vol. 414. – P. 286-289.
- [3] Zandonella, C. Terahertz imaging: T-ray specs / C. Zandonella // Nature. – 2003. - Vol. 424. – P. 721-722.
- [4] Terahertz Sources and Systems (NATO Science Series, Ser. II, Vol. 27) / Edited by R.E. Miles, P. Harrison, D. Lippens. - Kluwer Academic Publishers, 2001. – 350pp.
- [5] Van der Weide D. Applications and Outlook for Electronic Terahertz Technology // Optics & Photonics News. – 2003. – Vol.14. – No.4. – P. 48-53.
- [6] 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.
- [7] Ajili, L. High power quantum cascade lasers operating at $\lambda \approx 87$ and 130 μm / L. Ajili [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2004. - Vol. 85. – No. 18. - P. 3986 - 3988.

- [8] Williams, B. S. Operation of terahertz quantum-cascade lasers at 164 K in pulsed mode and at 117 K in continuous-wave mode / B. S. Williams [et al.] // Opt. Express. – 2005. - Vol. 13. - No. 9. - P. 3331 - 3339.
- [9] Алешкин, В. Я. Генерация разностной моды в полупроводниковых лазерах / В. Я. Алешкин [и др.] // ФТП. – 2001. – Т. 35. – Вып. 10. – С. 1256-1260.
- [10] Кнап, W. Resonant detection of subterahertz radiation by plasma waves in a submicron field-effect transistor / W. Кнап [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2002. - Vol. 80. - P. 3433-4335.
- [11] Dunn, G M Current instability in power HEMTs / G M Dunn [et al.] // Semicond. Sci. Technol. – 2001. - Vol. 16. - P. 562–566.
- [12] Mateos, J. TeraHertz Emission and Noise Spectra in HEMTs / J. Mateos [et al.] // AIP Conf. Proc. – 2005. - Vol. 800. – P. 423 - 432.
- [13] Rochat, M. Far-infrared ($\lambda = 88 \mu\text{m}$) electroluminescence in a quantum cascade structure / M. Rochat [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 1998. - Vol. 73. - P. 3724 – 3726.

Основные публикации автора по теме диссертации

- [A1] Алёшкин, В. Я. Исследование нелинейных оптических явлений в инжекционных полупроводниковых лазерах с квантовыми ямами InGaAs/GaAs / В. Я. Алёшкин, В. И. Гавриленко, Б. Н. Звонков, К. В. Маремьянин, С. В. Морозов, С. М. Некоркин. // ФТП. – 2005. – Т. 39. Вып. 1. – С. 153-156.
- [A2] Aleshkin, V. Ya. Parametric Generation of Middle and Far Infrared Radiation in GaAs-Based Semiconductor Lasers and Waveguides / V. Ya. Aleshkin, A. A. Afonenko, A. A. Biryukov, V. I. Gavrilenko, A. A. Dubinov, Vl. V. Kocharovskiy, S. V. Morozov, K. V. Maremyanin, S. M. Nekorkin, B. N. Zvonkov and N. B. Zvonkov // ACTA PHYSICA POLONICA A. – 2005. - Vol. 107. - P. 7-13.
- [A3] Гавриленко, В. И. Электронный транспорт и детектирование терагерцового излучения в субмикронном полевом транзисторе GaN/AlGaIn / В. И. Гавриленко, Е. В. Демидов, К. В. Маремьянин, С. В. Морозов, W. Кнап, J. Lusakowski // ФТП. – 2007. - Т. 41. Вып. 2. - С. 238-241.
- [A4] Biryukov, A. A. Experimental Study of Nonlinear Mode Mixing in Dual-Wavelength Semiconductor Lasers / A. A. Biryukov, S. M. Nekorkin,

B. N. Zvonkov, V. Ya. Aleshkin, A. A. Dubinov, V. I. Gavrilenko, K. V. Maremyanin, S. V. Morozov, A. A. Belyanin, V. V. Kocharovskiy and Vl. V. Kocharovskiy // *Laser Physics*. – 2007. - Vol. 17. No. 5. - P. 684–687.

[A5] Бирюков, А. А. Исследование межзонных каскадных лазеров с туннельным переходом / А. А. Бирюков, Б. Н. Звонков, С. М. Некоркин, В. Я. Алёшкин, В. И. Гавриленко, А. А. Дубинов, К. В. Маремьянин, С. В. Морозов, А. А. Белянин, В. В. Кочаровский, Вл. В. Кочаровский // *Известия РАН Серия физическая*. – 2007. - Т. 71. Вып. 1. - С. 100-103.

[A6] Nekorkin, S. M. Nonlinear mode mixing in dual-wavelength semiconductor lasers with tunnel junctions / S. M. Nekorkin, A. A. Biryukov, P. B. Demina, N. N. Semenov, B. N. Zvonkov, V. Ya. Aleshkin, A. A. Dubinov, V. I. Gavrilenko, K. V. Maremyanin, S. V. Morozov, A. A. Belyanin, V. V. Kocharovskiy, Vl. V. Kocharovskiy // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. - Vol. 84. No. 15. - P. 1106-1109.

[A7] Maremyanin, K. V. Parametric generation of mid IR radiation in GaAs/InGaAs/InGaP lasers and waveguides / K. V. Maremyanin, S. M. Nekorkin, A. A. Birukov, S. V. Morozov, V. Ya. Aleshkin, V. I. Gavrilenko, Vl. V. Kocharovskiy // *Narrow Gap Semiconductors*, eds Kono & Leotin, Institute of Physics Conference Series Number 187, published by Taylor & Franics", ISBN No 0750310162. – 2006. - P. 365-370.

[A8] Алёшкин, В. Я. Управление интенсивностями линий генерации двухчастотного лазера / В. Я. Алёшкин, А. А. Афоненко, В. И. Гавриленко, Б. Н. Звонков, Ю. В. Кутергина, К. В. Маремьянин, С. В. Морозов, С. М. Некоркин // VI Российская конференция по физике полупроводников "Полупроводники 2003": Тезисы докладов, Санкт-Петербург, Россия, 27–31 октября 2003. – СПб: ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, 2003. – С. 512-513.

[A9] Алёшкин, В. Я. Наблюдение излучения среднего ИК диапазона в полупроводниковых лазерах, генерирующих две частотные полосы в ближнем ИК диапазоне / В. Я. Алёшкин, В. И. Гавриленко, Б. Н. Звонков, К. В. Маремьянин, С. В. Морозов, С. М. Некоркин // *Нанофотоника: Материалы всероссийского совещания*, Нижний Новгород, Россия, 2–6 мая 2004. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2004. – С. 220–223.

[A10] Aleshkin, V. Ya. Experimental observation of emission of mid IR in semiconductor lasers generating two frequency lines in the near IR range / V. Ya. Aleshkin, B. N. Zvonkov, V. I. Gavrilenko, S. V. Morozov,

S. M. Nekorkin, K. V. Maremjanin // Nanostructures: Physics and Technology: Proc. 12th International Symposium, St. Petersburg, Russia, June 21–25, 2004. – St. Petersburg: Ioffe Institute, 2004. – P. 54–55.

[A11] Aleshkin, V. Ya. Detection of emission in the mid IR in semiconductor lasers generating two frequency lines in the near IR range / V. Ya. Aleshkin, B. N. Zvonkov, V. I. Gavrilenko, S. V. Morozov, S. M. Nekorkin, K. V. Maremjanin, G. A. Maximov, D. O. Filatov, V. V. Levichev, V. P. Mishkin // Mid-Infrared Optoelectronics Materials and Devices: Proc. 6th International Conference, St. Petersburg, Russia, June 26–30, 2004. – P. 80–81.

[A12] Aleshkin, V. Ya. Parametric generation of middle and far infrared radiation in gaas-based semiconductor lasers and waveguides / V. Ya. Aleshkin, A. A. Afonenko, V. I. Gavrilenko, A. A. Dubinov, Vl. V. Kochrovsky, S. V. Morozov, K. V. Maremjanin, S. M. Nekorkin, B. N. Zvonkov, N. B. Zvonkov // Ultrafast Phenomena in Semiconductors: Proc. 12th International Symposium, Vilnius, Lithuania, August 22-25, 2004. - P. 15.

[A13] Некоркин, С. М. Генерация суммарной гармоника в полупроводниковых лазерах InGaP/GaAs/InGaAs с составным резонатором / С. М. Некоркин, А. А. Бирюков, К. В. Маремьянин, В. Я. Алёшкин, С. В. Морозов, Вл. В. Кочаровский // Нанозифика и нанозлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 25 - 29 марта 2005. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2005. – С. 443–444.

[A14] Морозов, С. В. Генерация суммарной гармоника в двухчиповых полупроводниковых лазерах InGaP/GaAs/InGaAs с составным резонатором / С. В. Морозов, К. В. Маремьянин, С. М. Некоркин, А. А. Бирюков, В. Я. Алёшкин, В. И. Гавриленко, Б. Н. Звонков, Н. Б. Звонков, Вл. В. Кочаровский // Полупроводниковые лазеры и системы на их основе: Сборник статей V Белорусско-Российского семинара, Минск, Беларусь, 1-5 июня 2005. – Минск: Институт физики им. Б.И. Степанова НАНБ, 2005. – С. 95-98.

[A15] Aleshkin, V. Ya. Generation of sum harmonic in two-chips GaAs/InGaAs/InGaP laser with composite resonator / V. Ya. Aleshkin, A. V. Birukov, V. I. Gavrilenko, Vl. V. Kocharovsky, K. V. Maremyanin, S. V. Morozov, S. M. Nekorkin, B. N. Zvonkov, N. B. Zvonkov // Nanostructures: Physics and Technology: Proc. 13th International Symposium, St. Petersburg, Russia, June 20–25, 2005. – St. Petersburg: Ioffe Institute, 2005.

– P. 106–107.

[A16] Маремьянин, К. В. Генерация суммарной гармоника в «двухчиповом» GaAs/InGaAs полупроводниковом лазере с составным резонатором / К. В. Маремьянин, С. М. Некоркин, С. В. Морозов, А. А. Бирюков, В. Я. Алешкин, В. И. Гавриленко, Б. Н. Звонков, Н. Б. Звонков, Вл. В. Кочаровский // VII Российская конференция по физике полупроводников "Полупроводники 2005": Тезисы докладов, Звенигород, Россия, 18-23 сентября 2005. – С. 93.

[A17] Маремьянин, К. В. Электронный транспорт и детектирование терагерцового излучения субмикронным полевым транзистором GaN/AlGaN / К. В. Маремьянин, А. А. Пархоменко, С. В. Морозов, Е. В. Демидов, В. И. Гавриленко, W. Кнар, J. Lusakowski, M. A. Poisson, E. Moran, C. Dua, C. Saquiere, D. Ducatteau // VII Российская конференция по физике полупроводников "Полупроводники 2005": Тезисы докладов, Звенигород, Россия, 18-23 сентября 2005. – С. 326.

[A18] Maremyanin, K. V. Parametric generation of mid IR radiation in GaAs/InGaAs/InGaP lasers and waveguides / K. V. Maremyanin, S. M. Nekorkin, A. V. Birukov, N. B. Zvonkov, S. V. Morozov, B. N. Zvonkov, V. Ya. Aleshkin, V. I. Gavrilenko, Vl. V. Kocharovsky // Narrow Gap Semiconductors: Abstr. 12th International Conference, Toulouse, France, July 3-7, 2005. - P. 84.

[A19] Маремьянин, К. В. Электронный транспорт и детектирование терагерцового излучения субмикронным полевым транзистором GaN/AlGaN / К. В. Маремьянин, С. В. Морозов, Е. В. Демидов, В. И. Гавриленко, W. Кнар, J. Lusakowski, M. A. Poisson, E. Moran, C. Dua, C. Saquiere, D. Ducatteau // Нанофизика и нанoeлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 13 - 17 марта 2006. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. – С. 441-442.

[A20] Бирюков, А. А. Исследование возможности создания межзонных каскадных лазеров с туннельным переходом / А. А. Бирюков, Б. Н. Звонков, С. М. Некоркин, В. Я. Алешкин, В. И. Гавриленко, А. А. Дубинов, К. В. Маремьянин, С. В. Морозов, А. А. Белянин, В. В. Кочаровский, Вл. В. Кочаровский // Нанофизика и нанoeлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 13 - 17 марта 2006. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. – С. 133-136.

- [A21] Biryukov, A. A. Interband cascade lasers with tunnel junction demonstrate dualwavelength generation / A. A. Biryukov, S. M. Nekorkin, B. N. Zvonkov, V. Ya. Aleshkin, A. A. Dubinov, V. I. Gavrilenko, K. V. Maremyanin, S. V. Morozov, A. A. Belyanin, V. V. Kocharovskiy, Vl. V. Kocharovskiy // Nanostructures: Physics and Technology: Proc. 14th International Symposium, St. Petersburg, Russia, June 26-30, 2006.–St. Petersburg:Ioffe Institute.–P.17-18.
- [A22] Morozov, S. V. Electron transport and detection of terahertz radiations by GaN/AlGaN submicronic field effect transistor / S. V. Morozov, K. V. Maremyanin, E. V. Demidov, V. I. Gavrilenko, W. Knap, J. Lusakowski, M. A. Poisson, E. Moran, C. Dua, C. Caquiere, D. Ducatteau // Nanostructures: Physics and Technology: Proc. 14th International Symposium, St. Petersburg, Russia, June 26-30, 2006. – St. Petersburg: Ioffe Institute, 2006. – P. 344-345.
- [A23] Biryukov, A. A. Experimental study of nonlinear mode mixing in dual-wavelength semiconductor lasers / A. A. Biryukov, S. M. Nekorkin, B. N. Zvonkov, V. Ya. Aleshkin, A. A. Dubinov, V. I. Gavrilenko, K. V. Maremyanin, S. V. Morozov, A. A. Belyanin, V. V. Kocharovskiy, Vl. V. Kocharovskiy // Coherent Control of the Fundamental Processes in Optics and X-ray-Optics (CCFP'2006): Program and Abstracts of The International Conference, Nizhny Novgorod, Russia, June 29- July 3, 2006.
- [A24] Гавриленко, В. И. Параметрическая генерация разностной частоты в лазерах и волноводах на основе полупроводников A_3B_5 / В. И. Гавриленко, В. Я. Алёшкин, А. А. Дубинов, К. В. Маремьянин, С. В. Морозов, А. А. Бирюков, Б. Н. Звонков, С. М. Некоркин, А. А. Афоненко // Квантовая электроника: Материалы VI Международной научно-технической конференции, Минск, Беларусь, 14-17 ноября 2006. – С. 67.
- [A25] Бирюков, А. А. Экспериментальное исследование нелинейного смешения мод в двухчастотном межзонном каскадном лазере с туннельным переходом / А. А. Бирюков, Б. Н. Звонков, С. М. Некоркин, Н. Н. Семенов, В. Я. Алёшкин, В. И. Гавриленко, А. А. Дубинов, К. В. Маремьянин, С. В. Морозов, А. А. Белянин, В. В. Кочаровский, Вл. В. Кочаровский // Нанозфизика и нанозлектроника: Материалы международного симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 10 - 14 марта 2007. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2007. – С. 533-534.
- [A26] Гавриленко, В. И. Генерация терагерцового излучения в квантовых каскадных структурах / В. И. Гавриленко, К. В. Маремьянин, М. Л. Орлов,

N. Dyakonova, W. Knap, Y. Todorov, I. Sagnes, C. Minot // Нанофизика и нанoeлектроника: Материалы международного симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 10 - 14 марта 2007. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2007. – С. 543-544.

[A27] Орлов, М. Л. Генерация терагерцового излучения в субмикронных полевых транзисторах с двумерным электронным газом / М. Л. Орлов, К. В. Маремьянин, С. В. Морозов, В. И. Гавриленко, N. Dyakonova, W. Knap, A. Shchepetov, Y. Roelens, S. Bollaert // Нанофизика и нанoeлектроника: Материалы международного симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 10 - 14 марта 2007. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2007. – С. 545-546.

[A28] Морозов, С. В. Генерация и детектирование терагерцового излучения в субмикронных полевых транзисторах с двумерным электронным газом / С. В. Морозов, В. И. Гавриленко, К. В. Маремьянин, М. Л. Орлов, F. Terpe, N. Dyakonova, W. Knap, A. Shchepetov, Y. Roelens, S. Bollaert // Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн: Тезисы докладов, Нижний Новгород, Россия, 12 - 15 марта 2007. - Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2007. – С. 38-39.

[A29] Orlov, M. L. Generation of THz radiation in submicron HEMTs with two-dimensional electron gas / M. L. Orlov, K. V. Maremyanin, S. V. Morozov, V. I. Gavrilenko, N. Dyakonova, W. Knap, A. Shepetov, Y. Roelens, S. Bollaert // Nanostructures: Physics and Technology: Proc. 15th International Symposium, Novosibirsk, Russia, June 25-29, 2007. – P. 143-144.

[A30] Гавриленко, В. И. Генерация терагерцового излучения в квантовых каскадных структурах / В. И. Гавриленко, К. В. Маремьянин, М. Л. Орлов, Д. В. Ушаков, N. Dyakonova, W. Knap, Y. Todorov, I. Sagnes, C. Minot // VIII Российская конференция по физике полупроводников "Полупроводники 2007": Тезисы докладов, Екатеринбург, Россия, 30 сентября–5 октября 2007.

[A31] Гавриленко, В. И. Генерация и детектирование терагерцового излучения в субмикронных полевых транзисторах с двумерным электронным газом / В. И. Гавриленко, К. В. Маремьянин, С. В. Морозов, N. Dyakonova, W. Knap // VIII Российская конференция по физике полупроводников "Полупроводники 2007": Тезисы докладов, Екатеринбург, Россия, 30 сентября – 5 октября 2007.

МАРЕМЬЯНИН Кирилл Владимирович

**ГЕНЕРАЦИЯ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ A_3B_5**

Автореферат

Подписано к печати 05.09.2007 г. Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН
603950, Нижний Новгород, ГСП-105