

Орлов Михаил Львович

**ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ, ДЕТЕКТИРОВАНИЕ И ЭМИССИЯ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН, Н.Новгород

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Романов Юрий Анатолиевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
доцент Оболенский Сергей Владимирович
Нижегородский Государственный Университет им.
Н.И.Лобачевского

кандидат физико-математических наук,
доцент Шалыгин Вадим Александрович
Санкт-Петербургский Государственный
Политехнический Университет

Ведущая организация: Саратовский филиал Института
радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Саратов

Защита состоится 28 октября 2010 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 27 сентября 2010 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, проф.

К.П. Гайкович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последние десятилетия наблюдается заметный прогресс в использовании низкоразмерных гетероэпитаксиальных структур в устройствах сверхвысокочастотной электроники. Выдающимися являются достижения в транзисторной электронике, где применение в конструкции приборов наноразмерных элементов расширило их применение практически на всю область миллиметровых волн. Многие исследовательские группы работают над продвижением их рабочего диапазона в еще более высокочастотную область спектра. Эта деятельность ведется в традиционном направлении путем масштабирования всех элементов конструкции к наноразмерам. Предельные возможности традиционного метода генерации электромагнитных сигналов на основе квазистатического принципа управления сигналами еще не достигнуты. Продолжаются работы по снижению шумов традиционных транзисторных устройств и продвижению их рабочего диапазона в более высокочастотную область спектра. Обнадешивающим примером могут служить, в частности, работы по использованию отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) на выходных характеристиках транзистора [1, 2] с целью улучшения его динамических и высокочастотных характеристик.

Параллельно с традиционными направлениями ведутся интенсивные исследования по разработке принципиально новых методов генерации и приема высокочастотного излучения, связанных с использованием разнообразных резонансов как в объемных полупроводниках, так и в квантовых, в том числе, многослойных периодических, гетероструктурах. Активно обсуждаются новые идеи, связанные с баллистическим транспортом и резонансными плазменными эффектами в короткоканальных транзисторных структурах с двумерным электронным газом [3].

Ясно, что решение проблемы создания эффективных полупроводниковых генераторов терагерцового диапазона, в том числе, на основе транзисторных устройств, немислимо без ясного понимания физических явлений, протекающих в гетерокомпозициях, и осмысления всех особенностей, проявляющихся на характеристиках реальных систем. Поэтому поиск новых высокочастотных эффектов и исследование особенностей поведения транспортных характеристик в короткоканальных транзисторных структурах, а также критическое осмысление наблюдаемых закономерностей, представляет достаточно актуальную на сегодняшний день задачу, связанную с общей проблемой продвижения рабочего диапазона полупроводниковых элементов в терагерцовый (ТГц) диапазон частот.

Цели работы:

- Изучение нелинейных явлений и механизмов, перспективных для эффективного преобразования и генерации излучения терагерцового диапазона частот низкоразмерными полупроводниковыми системами;
- Анализ перспектив использования в активной части канала полевого транзистора низкоразмерных систем, включая двумерные полупроводниковые сверхрешетки со сложным законом дисперсии электронов в минizonaх, в условиях высоких плотностей пропускаемых по каналу токов;

В связи с указанными общими целями, представляемая диссертационная работа была направлена на **решение следующих задач:**

- анализ существующих способов генерации и приема ТГц излучения полупроводниковыми структурами;

- экспериментальное и теоретическое исследование особенностей транспорта горячих электронов в короткоканальных транзисторных гетероструктурах $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$;

- экспериментальное и теоретическое исследование эффектов генерации и детектирования ТГц излучения полевыми транзисторами $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ с двумерным электронным газом в транспортном канале;

- теоретическое исследование особенностей нелинейного электронного транспорта в планарных структурах с каналом, сформированным на базе двумерной квантовой сверхрешетки с неаддитивным законом дисперсии электронных минизон.

Экспериментальная часть настоящей работы направлена в основном на исследование нелинейных высокочастотных характеристик транзисторов

$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ с селективным легированием и поиск на них особенностей, указывающих на принципиальную возможность реализации в системе механизмов, перспективных для резонансного возбуждения излучения ТГц диапазона частот.

Научная новизна

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

1. Показано, что в двумерных квантовых сверхрешетках с неаддитивным законом дисперсии минизон может возникать высокочастотная отрицательная дифференциальная проводимость (ОДП) в статическом поле, поляризованном ортогонально высокочастотному. Такая ОДП может существовать на участках ВАХ с положительными продольной и поперечной относительно направления статического поля низкочастотными проводимостями, что является необходимым условием для реализации устойчивого эффекта высокочастотной генерации на блоховских осцилляциях электронов.

2. На выходных характеристиках короткоканального полевого транзистора на основе гетероструктуры $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ обнаружено аномально низкое значение напряжения возникновения ОДП, определяемое величиной напряжения между затвором и стоком прибора.

3. При комнатной температуре изучены полевые, токовые и частотные зависимости детектирующей способности короткоканального полевого транзистора на основе гетероструктуры $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$. Показано, что немонотонный характер высокочастотного отклика транзистора в диапазоне частот 400 - 700 ГГц в зависимости от напряжения, прикладываемого к затвору транзистора, связан с перераспределением полей в канале структуры и, как следствие, с изменением вклада различных нерезонансных механизмов нелинейности в общую нелинейность системы.

4. Применение перестраиваемого магнитным полем фильтра на основе эффекта циклотронного резонанса (ЦР) позволило обнаружить в спектре излучения короткоканального полевого транзистора $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ с двумерным электронным газом при низких температурах не наблюдавшиеся ранее узкие

спектральные линии на частотах в диапазоне 0,9 - 1,4 ТГц, перестраиваемые напряжением исток-сток.

Научная и практическая значимость работы

1. Полученные результаты, касающиеся транспортных явлений, протекающих в короткоканальных полевых транзисторах с двумерным электронным газом, способствуют лучшему пониманию работы транзисторов и могут быть использованы на практике для расширения рабочего частотного диапазона транзисторов в сверхвысокочастотную область.

2. Наблюдаемые и изученные особенности характеристик излучения плазменных волнами в короткоканальных полевых транзисторах с двумерным электронным газом могут быть использованы для создания миниатюрных излучателей терагерцового диапазона.

3. Результаты, полученные в области теории двумерных квантовых сверхрешеток, могут быть использованы при разработке блоховского генератора излучения ТГц диапазона частот на двумерных массивах квантовых точек.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Отрицательное дифференциальное сопротивление на выходных характеристиках $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ транзистора обусловлено эффектом межслоевого переноса горячих 2D электронов при резонансном туннелировании их с 3-го уровня размерного квантования в потенциальной яме на состояния примесных центров в области дельта-легирования барьерного слоя.

2. Короткоканальные полевые $\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ транзисторы с двумерным электронным газом обнаруживают при комнатной температуре немонотонное поведение нелинейного отклика на высокочастотное излучение (420-740 ТГц) с ростом напряжения на затворе транзистора, что обусловлено перераспределением полей в канале и изменением вклада нерезонансных механизмов нелинейности системы.

3. При низких температурах спектр излучения электронной плазмы короткоканального $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As} / \text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ транзистора при напряжениях исток-сток U_{DS} , превышающих глубину квантовой ямы ($U_{DS} > U_{QW}$) в слое $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$, содержит узкие резонансные линии в терагерцовом диапазоне, ширина и положение которых зависит от прикладываемых напряжений.

4. В планарных структурах, содержащих двумерную квантовую сверхрешетку с неаддитивным законом дисперсии минизон может возникать высокочастотная ОДП в статическом поле, направленном ортогонально высокочастотному.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях и симпозиумах, в том числе, на Европейской конференции по полупроводниковым источникам и детекторам ТГц излучения (Bombannes, Франция, 2007); на российских конференциях по физике полупроводников (Москва-2005; Екатеринбург-2007); на международной конференции по микро- и нанoeлектронике (Звенигород, 2005); на I рабочем совещании по полупроводниковым нанокристаллам - SEMINANO2005 (Будапешт, Венгрия, 2005); на международном симпозиуме «Наноструктуры: Физика и технология» (Санкт-Петербург-2004, Новосибирск-2007); на Всероссийском совещании «Нанофотоника» – 2004 и симпозиуме «Нанофизика и нанoeлектроника»

- 2007 и 2008 годов (ИФМ РАН, Н.Новгород), на 3-ей международной конференции по физике электронных материалов (Калуга, 2008), на IX и X молодежной школе-семинаре по проблемам физики конденсированного состояния вещества (Екатеринбург, ИФМ УрО РАН, 2008 и 2009), а также на семинарах ИФМ РАН, НПО Салют, Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского, Нижегородского технического университета им. Р.Е.Алексеева, Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, отдела физики полупроводников Института физики металлов УрО РАН и кафедры физики полупроводников и наноэлектроники радиофизического факультета СПбГПУ.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 25 печатных работ, в том числе 9 статей в реферируемых журналах, 4 статьи в трудах международных и 1 статья в трудах российской конференции, а также 11 тезисов докладов на 5 международных и 6 российских конференциях.

Личный вклад автора диссертации

- Основной во все полученные экспериментальные результаты, представленные в диссертации по исследованию свойств короткоканальных транзисторов [A2, A5, A12-A14, A17, A19-A21].

- Равнозначный (совместно с Ю.А. Романовым) в теоретический анализ двумерных квантовых сверхрешеток [A1, A10, A11, A18].

- Равнозначный (совместно с Л.К. Орловым) в расчет выходных характеристик транзистора и эффекта детектирования в квазистационарном пределе [A4-A9, A15-A17, A23-A25].

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации составляет 157 страниц, включая 90 рисунков и 2 таблицы. Список цитированной литературы включает 120 наименований, список публикаций автора по теме диссертации – 25 наименований.

Основное содержание работы

В первой главе диссертации рассмотрены некоторые наиболее близкие к рассматриваемой в диссертационной работе проблематике методы возбуждения и детектирования излучения длинноволновой части терагерцового диапазона в полупроводниковых гетероструктурах. Приведены результаты экспериментов (см. например, [1-4]), представленных в литературе по этому направлению, с анализом механизмов генерации излучения. Обсуждается привлекательная для генерации ТГц излучения идея каскадного лазера, которые уже освоили среднюю ИК область и в последние годы активно продвигаются в ТГц диапазон частот [5]. Анализируются новые принципы работы полевых транзисторов, направленные на расширение диапазона их рабочих частот. В частности, в связи с задачами, решаемыми в экспериментальной части диссертационной работы, значительное внимание сосредоточено на эффекте формирования падающего участка на выходных характеристиках этого устройства [1]. Кроме того, обсуждается эффект резонансного возбуждения двумерных плазменных волн в канале полевого

транзистора [3] и возможность его проявления в наблюдаемых на эксперименте зависимостях.

Во второй главе диссертации приведены электрофизические характеристики изучаемых транзисторных гетероструктур, а также рассмотрены электрические свойства реальных приборов, использованных в эксперименте. Особое внимание уделено низкотемпературному транспорту и магнитотранспорту электронов в слабых полях с целью определения возможных каналов протекания тока в структурах и анализа особенностей механизмов рассеяния в системах с развитой морфологией поверхности. Показано, что увеличение степени шероховатости поверхности образцов, например, вследствие проведения каких-либо технологических операций в процессе изготовления транзисторов либо при подготовке образцов к измерениям, заметно сказывается на величине подвижности носителей заряда вследствие возрастания рассеяния 2D электронов на дальнедействующем флуктуационном потенциале [A6].

Во втором разделе второй главы диссертации анализируются выходные характеристики транзистора $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.47}\text{As}$, полученные на постоянном токе при изменении напряжения на затворе от $-0,25\text{В}$ до $+0,1\text{В}$. Наиболее яркой особенностью измеренных характеристик является наблюдение на них хорошо выраженного участка отрицательного дифференциального сопротивления при аномально низких напряжениях ($\sim 0,1\text{ В}$) на стоке транзистора в диапазоне температур от температуры жидкого гелия до комнатной, как при положительном (рис. 1а, символы), так и отрицательном смещении U_G на затворе транзистора [A14, A15].

Появление аномально низкого порога ОДС на ВАХ короткоканальной транзисторной структуры (\bar{U}_D) является следствием не только уменьшения эффективной длины затвора [6], но и следствием снижения плотности электронов в канале транзистора, что отмечается впервые. Разница между \bar{U}_D и напряжением на затворе сохранялась во всем интервале прикладываемых полей, что указывало на существование внутри образца некоторого поперечного поля, определяющего наблюдаемый эффект переключения токов в транзисторе [A5, A6].

При оценке эффекта ОДС, наблюдаемого в структурах, мы предполагали, что в системе имеет место перенос горячих электронов между двумя транспортными каналами с разными характеристиками электронов. Анализ выходных характеристик транзистора, проведенный на базе двухтемпературной модели переноса заряда, показал хорошее соответствие теоретических зависимостей с экспериментальными кривыми (рис. 1а). Проведенные расчеты показывают, что в структуре в гремящем электрическом поле возникает второй проводящий канал с иными, чем в основном транспортном канале, характеристиками электронов.

В диссертации анализируется ряд причин, с определенной степенью вероятности ответственных за наблюдаемое явление. Обсуждаются причины, связанные с анизотропией контактов и появлением дополнительного внутреннего градиента потенциала вдоль длины канала и с асимметрией потенциала квантовой ямы. Показано, что хотя асимметрия волновых функций на первом и втором уровнях размерного квантования в канале (по отношению к рассеивающему потенциалу дельта-слоя в верхнем барьерном слое) и может приводить к разным транспортным характеристикам электронов вдоль плоскости слоя структуры, более вероятным

является формирование в верхнем барьерном слое параллельного транспортного канала с повышенной плотностью состояний и низкой подвижностью электронов. Расчет потенциала в структуре (рис.1б) показал, что искажение краев зон в слоях гетеросистемы вследствие наложения потенциала пространственно разделенных свободных электронов и связанных зарядовых центров в области дельта-легирования обеспечивает формирование второго параллельного транспортного канала с более низкой, чем в основном двумерном транспортном канале, подвижностью электронов. И все наблюдаемые на выходных характеристиках исследуемого транзистора закономерности (рис.1а) объясняются переходами горячих электронов с третьего уровня размерного квантования квантовой ямы слоя $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ в параллельный канал.

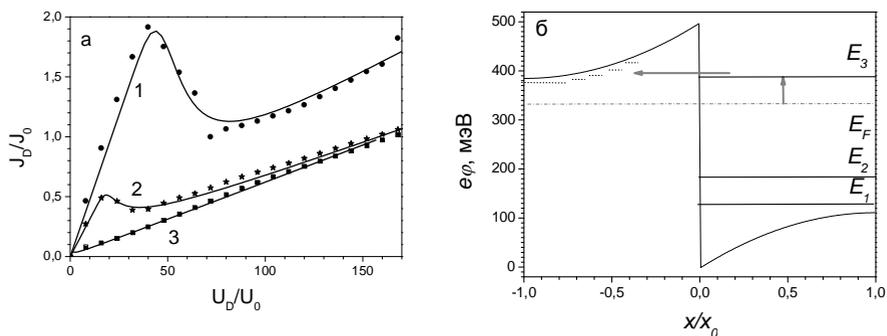


Рис. 1. (а) Измеренные (символы) и рассчитанные (линии) выходные характеристики транзистора при $U_G(\text{В}) = 0,1(1), 0,05(2), 0(3)$, расчет проведен в рамках двухтемпературной модели переноса [7, А5], $J_0 = 2\text{мА}$, $U_0 = 2\text{мВ}$; (б) распределение потенциала в окрестности гетерограницы квантовой ямы с верхним легированным до $N_D = 2 \cdot 10^{18}\text{см}^{-3}$ барьерным слоем при $T = 5\text{К}$; E_j - спектр энергетических уровней, E_F - уровень Ферми, пунктирные линии – уровни мелких донорных центров; $x_0 = 22,5\text{нм}$ – дебаевский радиус экранирования [А6].

Условия, необходимые для формирования ОДС в структуре могут возникнуть также вследствие разогрева носителей заряда электрическим полем в неоднородном потенциале слоя $\text{In}_{0,52}\text{Ga}_{0,48}\text{As}$. Неоднородный потенциал в канале может возникнуть вследствие флуктуаций состава $x \rightarrow x(r)$ твердого раствора, в том числе, за счет эффекта спинодального распада, по причине выраженной морфологии внешней поверхности либо внутренних гетерограниц, а также из-за зависимости толщины канала от координаты $d_{\text{ch}} \rightarrow d_{\text{ch}}(r)$ в упруго-напряженных слоях гетероструктуры. Оценки, проведенные в настоящем разделе диссертации, показывают, что указанная ситуация является вполне реальной, если предположить возможность образования в областях повышенного сопротивления пленки локальных наноразмерных областей с аномально высокой плотностью состояний, характерной для одномерных и квазиульмерных систем.

Данный вывод подтверждается результатами анализа проводимости специально приготовленных структур с сильно развитой морфологией поверхности, формирующей неоднородный потенциал в канале транзистора. Вариантом

рассматриваемых структур является полевой транзистор с квазиодномерным каналом, реализуемым в плоскости двумерной системы путем вытравливания на поверхности структуры комбинации V-образных канавок [2]. Расчет выходных характеристик данных транзисторов, с хорошо выраженным участком отрицательной проводимости, с использованием двухтемпературной модели переноса электронов в плоскости слоя между участками локализации носителей заряда различной размерности, демонстрирует хорошее согласие теории и эксперимента [A6].

В третьей главе диссертации исследуются высокочастотные свойства короткоканального полевого транзистора $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.47}\text{As}$, включенного в схему детектирования ТГц излучения. Интерес, проявляемый к этим задачам, связан с задачей возбуждения двумерных плазменных волн в подзатворной плазме полевого транзистора. Важным фактором является и предсказываемая теорией [8] возможность наблюдения аномально высокой чувствительности короткоканального НЕМТ транзистора к ТГц излучению в окрестности плазменного резонанса и узкополосность его характеристик. Отсюда и заинтересованность многих исследователей в обнаружении плазменного резонанса в нелинейном отклике электронной подсистемы транзистора на высокочастотное возбуждение. Эффект детектирования на подзатворных плазменных волнах в простейшем случае удовлетворяет соотношению $\Delta U \propto 1/\{(f - f_0)^2 + (\hbar/\tau_{\text{eff}})^2\}$. Плазменная частота f_0 находится из равенства $f_0 \approx s(1 - v_0^2/s^2)/L_{\text{eff}}$, где L_{eff} – эффективная длина подзатворной области, $s = (e^2 n_s / C_G m^*)^{1/2}$ – скорость двумерных плазменных волн, C_G – емкость затвора транзистора, v_0 – скорость дрейфа электронов с массой m^* в канале с поверхностной концентрацией n_s . В соответствии с проведенными оценками, при отсутствии тока в исследуемом нами транзисторе ($v_0 = 0$) $f_0 \approx 1,5$ ТГц. При пропускании тока через транзисторную структуру резонансная частота f_0 смещается в более низкочастотную область спектра, что является дополнительным основанием в пользу возможности возбуждения в системе резонансных плазменных колебаний. Особенностью экспериментальной части настоящей работы, наряду с выбором типа исследуемого транзистора, является использование в качестве внешнего источника высокочастотного сигнала узкополосных генераторов на базе перестраиваемых по частоте ламп обратной волны (ЛОВ) и проведение измерений при комнатной температуре. На нескольких транзисторах $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.47}\text{As}$ при комнатной температуре на частотах в диапазоне 420-740 ГГц был измерен фотоотклик системы в зависимости от величины тока, пропускаемого через структуру, от напряжения на затворе транзистора и частоты детектируемого сигнала [A2, A3, A19-A21].

Среди наблюдаемых особенностей можно выделить следующие: 1 – резкое увеличение фотоотклика системы на высокочастотное излучение с ростом пропускаемого через структуру тока, 2 – немонотонный, с максимумом, вид зависимости фотоотклика от напряжения на затворе, испытывающей сдвиг с ростом напряжения между истоком и стоком (величиной дрейфового тока в канале транзистора); 3 – специфическая частотная зависимость фотоотклика в области высоких (400-700 ГГц) частот.

Проводимый традиционно только на основе резонансной плазменной модели анализ экспериментальных данных [А2, А3] недостаточен без сопоставления полученных результатов с вычислениями на базе простейших квазистатических моделей. Особенно по отношению к наиболее часто рассматриваемым типам зависимостей высокочастотного отклика от напряжений, подаваемых на контакты транзистора, тем более в диапазоне частот, удовлетворяющих условию $\omega t \leq 1$ при комнатной температуре. Ясно, что наблюдаемые немонотонные зависимости фотоотклика транзистора от прикладываемых напряжений могут быть обусловлены не только проявлением резонансного эффекта в электронной плазме, но и просто изменением вклада более традиционных механизмов нелинейности, также приводящих к эффекту выпрямления ТГц излучения. Это связано с тем, что изменение напряжения на затворе транзистора не только меняет концентрацию электронов (резонансную плазменную частоту) в транспортном канале, но и меняет вдоль длины канала поперечную компоненту поля, определяющую, в свою очередь, некоторые характеристики транспортного канала транзистора [А4, А7].

Учет особенностей включения транзисторов (по сравнению с диодами) в схему детектирования высокочастотного сигнала даже на примере простейшей квазистатической модели транзистора показывает, что проявление в транзисторных структурах специфических эффектов, например, таких как перекрытие и отсечка транспортного канала, обуславливающих появление в структуре неоднородного поперечного квазистационарного электрического поля, нарастающего от истока к стоку, приводит к появлению в системе дополнительных нелинейностей «градиентного» типа [А4]. Нелинейности «градиентного» типа, связанные с существованием градиента (вдоль транспортного канала) поперечной компоненты электрического поля в транзисторе, обуславливают изменение характеристик канала и носителей заряда в нем вдоль его длины. Допустимые координатная зависимость ширины двумерного транспортного канала, энергетического спектра электронов, их равновесной концентрации и подвижности являются прямым следствием координатной зависимости в условиях протекания тока, поперечной компоненты электрического поля (разности потенциалов между затвором и каналом) при смещении от истокового к стоковому контакту транзистора. Эти, не рассматриваемые ранее, особенности транзисторного элемента, очевидно, также могут приводить к немонотонным зависимостям вольт-ваттной чувствительности транзисторного СВЧ детектора от прикладываемых напряжений.

Проведенный анализ квазистатического отклика транзистора по его выходным характеристикам показал хорошее качественное совпадение результатов теоретического анализа с высокочастотным экспериментом, что позволяет предположить, что физические явления, ответственные за особенности, наблюдаемые на выпрямляющих характеристиках системы, могут быть обусловлены изменением вклада нерезонансных механизмов нелинейности в общую нелинейность системы вследствие изменения полей в канале транзистора. Данный вывод подтверждается и исследованиями частотных зависимостей вольт-ваттной чувствительности образца [А7].

Поиск плазменного резонанса в системе надежнее всего вести, основываясь на частотных зависимостях выпрямленного сигнала, описывающих дисперсионные характеристики системы при постоянных значениях параметров транзисторной

структуры. Роль частотной дисперсии в формировании вида изучаемых кривых проявляется на частотах свыше 400 ГГц, что следует из простого сравнения зависимостей ВВЧ от U_G , снятых на разных частотах принимаемого сигнала. Максимум ВВЧ смещается по U_G с ростом частоты сигнала, и проявляется только на высоких частотах. Частотные зависимости отклика с учетом характерного вида спектра лампы приведены на рис.2б. Результаты измерений демонстрируют наличие сильной частотной дисперсии в системе в указанном диапазоне частот без проявления явных резонансных особенностей в диапазоне частот 550-650 ГГц, соответствующих максимальным значениям ВВЧ транзистора, имеющих место на кривых рис.2а. Полученные результаты позволяют сделать вывод о доминирующей роли нерезонансных механизмов нелинейности в формировании особенностей, наблюдаемых на экспериментальных кривых [А7]. Искомая резонансная плазменная частота вероятнее всего лежит в более высокочастотной области спектра за пределами рабочего диапазона используемой ЛОВ.

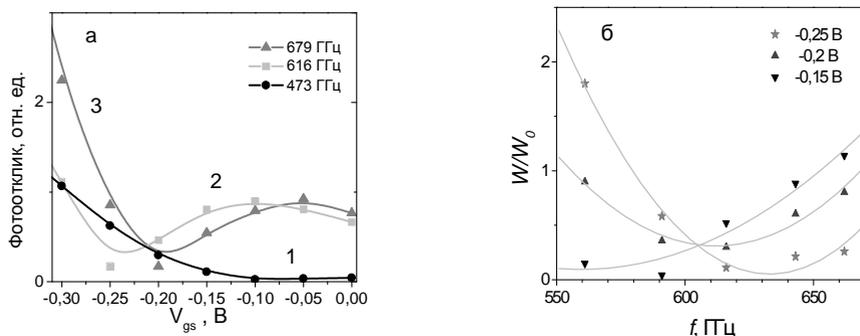


Рис.2. Фотоотклик $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ транзистора (а) - как функция напряжения смещения на затворе для разных частот возбуждения f и (б) - как функция частоты генератора f для напряжений на затворе U_G , меняющихся от -0,15В до -0,25В (фотоотклик приведен к интенсивности W_0 лампы ЛОВ-74) при фиксированном значении напряжения между истоком и стоком, $U_D = 0,3\text{В}$ [А7].

Четвертая глава диссертации посвящена проблеме генерации ТГц излучения полевыми транзисторами. Основная направленность проводимых по данной проблеме многими авторами исследований [9] связана с экспериментальной проверкой модели Дьяконова-Шура [3], предсказывающей возможность эффективной генерации транзистором электромагнитного излучения в ТГц области спектра, обусловленной возбуждением в транзисторе двумерных плазменных волн при пропускании тока в канале.

В связи с этим одной из рассматриваемых нами задач являлось применение более эффективной, чем использованная ранее, методики приема ТГц излучения и выделения узкополосных резонансных линий на фоне широкополосного излучения. В связи с этим нами для изучения спектра генерируемого транзистором сигнала было применено комбинированное приемное устройство, включающее высокочувствительный широкополосный кремниевый болометр и узкополосный ЦР

фильтр на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs. Резонансная частота фильтра перестраивалась магнитным полем при его изменении в диапазоне 0-10 Т.

Использование узкополосных фильтров позволило нам впервые в спектре излучения полевого транзистора $\text{In}_{0,52}\text{Ga}_{0,48}\text{As}/\text{In}_{0,53}\text{Al}_{0,47}\text{As}$ выделить (рис.3) и исследовать совокупность линий на частотах близких к 0,9 и 1,4 ТГц, не наблюдавшихся ранее другими авторами. Особенностью выделенных спектральных линий являлось наблюдение их только при низкой температуре (4-20К) [A5, A14] и существование зависимости амплитуды, положения и ширины пиков от величины пропускаемого через структуру тока (прикладываемого к стоковому контакту напряжения) [A6, A15].

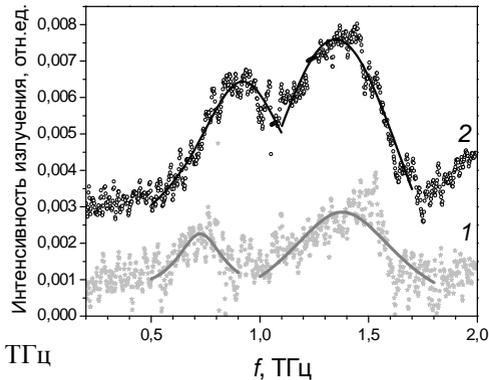


Рис.3. Нормализованный спектр излучения транзистора при $T=4,2\text{K}$, $U_G=0,05\text{В}$, $U_D=0,6\text{В}$ (1); $0,7\text{В}$ (2) [A7, A17].

составляющая на частоте $\sim 0,9$ ТГц связывается с распространением плазменной моды со скоростью $s = 6,9? 10^7$ см/с [9]. Можно предположить, что появление двух линий в спектре излучения транзистора (рис.3) обусловлено возбуждением плазменных волн двумя группами горячих носителей, движущимися с разными дрейфовыми скоростями. Вторая группа носителей появляется, вероятнее всего, вследствие перехода части 2D электронов в InGaAs слое из Г-долины в L-долину с энергией лежащей в надбарьерной области [A6]. Наблюдаемые резонансные частоты связаны соотношением: $f_{01} / f_{02} = (s-v_{01}) / (s-v_{02})$, где при $v_{02} \ll v_{01} = v_{dr} = 3? 10^7$ см·с⁻¹, получаем оценку $s = 5? 10^7$ см·с⁻¹. Средняя скорость электронов во втором транспортном канале, равная $v_{02} = 2? 10^6$ см·с⁻¹, обуславливает возможность генерации излучения в системе на частоте второй более высокочастотной резонансной плазменной моды.

В пятой главе диссертации теоретически рассмотрены перспективы использования двумерных квантовых сверхрешеток, в том числе, в качестве активного элемента канала полевого транзистора. Основной прогресс в освоении субмиллиметрового диапазона длин волн связан с переходом к низкоразмерным системам: в 80-90-ые годы к двумерным транзисторам с селективным легированием; после 2000 г. - к одномерным системам с затвором гребенчатого типа. В перспективе вероятен переход к использованию в активной части структуры двумерных массивов квантовых точек (нитей), связанных туннелированием и

Проведенные в главе 2 исследования особенностей выходных характеристик транзистора и анализ условий, при которых на эксперименте реализуется эффект резонансной генерации на высоких частотах, позволяют сделать определенные заключения относительно причины расщепления линии в спектре излучения транзистора. В литературе [9] наиболее часто рассматривается механизм генерации излучения, связанный с возбуждением двумерных плазменных колебаний в электронном канале транзистора. Наблюдаемая в более ранних работах низкочастотная спектральная

формирующих канал, образованный двумерной квантовой сверхрешеткой (2DSL). В связи с этим, в работе акцент делается на изучении транспортных свойств 2DSL, характеризующихся неаддитивным законом дисперсии электронов в двумерных минizonaх:

$$\varepsilon(\vec{k}) = \Delta_1 \left\{ 1 - \frac{1}{2} [\cos(k_1 d_1) + \cos(k_2 d_2)] \right\} + \Delta_2 \{ 1 - \cos(k_1 d_1) \cos(k_2 d_2) \},$$

где $\varepsilon(k)$ и k – энергия и волновой вектор электрона в плоскости 2DSL, k_i – его компоненты, $\Delta_{1,2} = \text{const}$.

В работе исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) и динамическая проводимость таких сверхрешеток (2DSL) в сильном статическом и слабом переменном электрических полях $E(t) = E_0 + E_1 \cos(\omega t)$, (E_0 и E_1 направлены под углом друг к другу в плоскости пленки) [A1, A10]. Наибольший интерес представляет характер областей отрицательных продольной и поперечной (относительно направления статического поля) динамических проводимостей при различной степени неаддитивности закона дисперсии электронов, т.е. для разных отношений Δ_1/Δ_2 . Продольная проводимость отрицательна ($\sigma_{\parallel} < 0$) при частотах

$\omega^2 < \Omega^2 - \tau^{-2}$ ($\Omega = \frac{eEd}{\hbar}$ – блоховская частота осцилляций электронов в минизоне, τ –

время релаксации квазиимпульса) независимо от отношения Δ_1/Δ_2 . В этой области отрицательна и статическая ОДП, что мешает наблюдению эффекта блоховской генерации. Однако знак поперечной динамической проводимости (σ_{\perp}) сильно зависит от отношения Δ_1/Δ_2 . Для неаддитивного закона дисперсии возможно появление поперечной высокочастотной ОДП в областях положительной низкочастотной дифференциальной проводимости. Эти области приведены на рис.4.

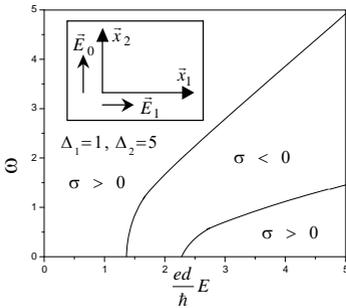


Рис.4. Области σ_{\perp} ($E_1 \perp E_0$) динамической ОДП на плоскости $(\omega\tau, \Omega\tau)$ для $\Delta_1=1; \Delta_2=5$.

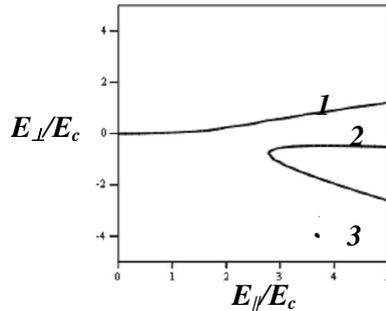


Рис.5. Зависимости поперечного электрического поля E_{\perp} от продольного поля E_{\parallel} для 2DSL с параметрами: $\varphi = 30^\circ; \Delta_1=1; \Delta_2=0,7; E_c = \hbar / ed\tau$

Детально изучены анизотропия тока и особенности токопереноса в двумерной сверхрешетке с конечной шириной [10]. Предполагается, что полосковая линия вырезана под углом φ к оси (x_1) сверхрешетки. Проведенные расчеты продемонстрировали возможность реализации в системе следующих эффектов: 1 – появление в образце поперечной электродвижущей силы в присутствии тока,

пропускаемого по структуре; 2 – распад токовой зависимости для продольного однородного электрического поля на несколько ветвей с отличающейся амплитудой поперечного электрического поля.

С неаддитивным слагаемым в дисперсионном уравнении связано появление при $\varphi \neq 45^\circ$ поперечной электродвижущей силы для любого по величине значения продольного поля E_{\parallel} . Более того, существует область электрических полей $E_{\parallel} < E_{cr}$, при которых поперечное электрическое поле является однозначной функцией продольного поля. Критическое продольное электрическое поле E_{cr} зависит от параметров Δ_1 , Δ_2 и угла φ . Параметр Δ_2 определяет поляризацию поперечной компоненты электрического поля. В частности, если для аддитивного закона дисперсии значения полей вдоль кривой 1 на рис.5 соответствует отрицательной величине поперечного электрического поля $E_{\perp} \leq 0$, то неаддитивное слагаемое делает возможным для этого решения появление положительного значения поперечной компоненты электрического поля [A11].

В заключении диссертации сформулированы наиболее значимые результаты работы.

1. На выходных характеристиках короткоканального транзистора $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As$ при положительном смещении на затворе обнаружен участок отрицательного дифференциального сопротивления при аномально низком значении критического напряжения, величина которого зависит от напряжения на затворе транзистора.

Предложена модель, объясняющая как появление падающего участка на выходных характеристиках транзистора $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As$, так и его зависимость от прикладываемого к затвору напряжений. Модель основана на эффекте межслоевого туннельного переноса горячих носителей с 3-его уровня размерного квантования в транспортном канале в барьерный слой.

2. В диапазоне частот 0,42 – 0,74 ТГц при комнатной температуре получены зависимости выпрямленного сигнала от частоты и напряжений на затворе и стоке короткоканального полевого гетеротранзистора $In_{0.7}Ga_{0.3}As/In_{0.52}Al_{0.48}As$ с двумерным электронным каналом. Обнаружено нарастание фоточувствительности с ростом пропускаемого тока и немонотонная, с максимумом, зависимость выпрямленного сигнала от напряжения на затворе. Частотные характеристики демонстрируют наличие дисперсии выпрямленного сигнала без проявления резонансных особенностей на измеряемых кривых. Проведены расчеты нерезонансного фотоотклика с учетом градиентных нелинейностей в канале транзистора и показано, что наблюдаемый немонотонный вид зависимости фоточувствительности от напряжения на затворе связан с изменением полей внутри структуры.

3. В короткоканальном полевом транзисторе $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As$ с двумерным электронным газом при напряжениях исток-сток U_{DS} , превышающих глубину квантовой ямы ($U_{DS} > U_{QW}$) в слое $In_{0.53}Ga_{0.47}As$, при низких температурах в спектре излучения электронной плазмы обнаружены две резонансные линии с частотами в диапазоне 0,87 - 1,36 ТГц, ширина и положение которых зависит от напряжения исток-сток. Двухчастотная генерация связывается с междолинным переносом горячих электронов и возникновением двух мод плазменных колебаний.

4. Теоретически исследован электронный транспорт в двумерной квантовой сверхрешетке с неаддитивным законом дисперсии в сильном постоянном электрическом поле. Обнаружена сильная анизотропия транспортных свойств и показана возможность наблюдения отрицательной высокочастотной проводимости без формирования в образце низкочастотных неустойчивостей. В двумерной сверхрешетке конечной ширины показана возможность появления в образце поперечной электродвижущей силы при пропускании тока через образец и распада токовой характеристики на несколько ветвей.

Список цитированной литературы

[1] Gribnikov, Z.S. Nonlocal and nonlinear transport in semiconductors: Real-space transfer effects / Z.S. Gribnikov, K.Hess, G.A. Kosinovsky. // *J. Appl. Phys.* – 1995. – V. 77. – №4. – P. 1337–1374.

[2] Jang, K.-Y. Negative differential resistance effects of trench-type InGaAs quantum-wire field-effect transistors with 50-nm gate-length / Kee-Youn Jang, Takeyoshi Sugaya, Cheol-Koo Hahn, Mutsuo Ogura, Kazuhiro Komori, Akito Shinoda, and Kenji Yonei. // *Appl. Phys. Lett.* – 2003. – V. 83. – P. 701–703.

[3] Diyakonov, M. Shallow water analogy for a ballistic field effect transistor: new mechanism of plasma wave generation by dc current / M. Diyakonov, M. Shur // *Phys. Rev. Lett.* – 1993. – V. 71. – № 15. – P. 2465–2468.

[4] Shastin, V.N. Stimulated terahertz emission from group -V donors in silicon under intracenter photoexcitation / V.N. Shastin, R.Kh. Zhukavin, E.E. Orlova, S.G. Pavlov, M.H. Rummeli, H.-W. Hubers, J.N. Hovenier, T.O. Klaassen, H.Riemann, I.V. Bradley, A.F.G. van der Meer // *Appl. Phys. Lett.* – 2002. – V.80. – №19. – P. 3512–3514.

[5] Williams, B.S. Terahertz quantum-cascade lasers / B.S. Williams // *Nature Photon.* – 2007 – V.1 – P.517-525.

[6] Mensz, P.M. High transconductance and large peak-to-valley ratio of negative differential conductance in three-terminal InGaAs/InAlAs real-space transfer devices / P.M. Mensz, P.A. Garbinski, A.Y. Cho, D.L. Sivco, S. Lurie // *Appl. Phys. Lett.* – 1990. – v.57. – P. 2558–2560.

[7] Hilsum, C. Transferred electron amplifiers and oscillators. / C. Hilsum. // *Proc. IRE.* – 1962. – v.50. - № 2. – P.185-189.

[8] Dyakonov, M. Detection, mixing and frequency multiplication of Terahertz radiation by two-dimensional electron fluid / M. Dyakonov, M. Shur // *IEEE. Transaction on electron devices.* – 1996. – v. 43. – № 3. – P. 380–386.

[9] Knap, W. Terahertz emission by plasma waves in 60 nm high electron mobility transistor / W. Knap, J. Lusakowski, T. Parenty, S. Bollaert, A. Cappy, V.V. Popov, M.S. Shur // *Appl. Phys. Lett.* – 2004. – v.84. – №13. – P. 2331–2333.

[10] Romanov, Yu.A. Nonlinear conductivity and current-voltage characteristics of two-dimensional semiconductor superlattices / Yu.A. Romanov, E.V. Demidov // *Semiconductors.* – 1997. – V. 31. – P. 252–254.

Основные публикации автора по теме диссертации

[A1] Orlov, M.L. Anisotropy of the conductivity and high-frequency characteristics of two-dimensional quantum superlattices in a strong electric field / M.L. Orlov, Yu.A. Romanov, L.K. Orlov // *Microelectronics Journal.* – 2005. – v. 36. – № 3-6. – P. 396–400.

[A2] Teppe, F. Room temperature tunable detection of subterahertz radiation in nanometer InGaAs transistor / F. Teppe, M. Orlov, A. El Fatimy, A. Tiberj, W. Knap, J.

Torres, V. Gavrilenko, A. Shchepetov, Y. Roelens, S. Bollaert. // Appl. Phys. Lett. – 2006. – 89. – P. 222109/1–3.

[A3] Knap, W. Plasma wave resonant detection of terahertz radiations by nanometric transistors / W. Knap, A. El Fatimy, J. Torres, F. Teppe, M. Orlov, V. Gavrilenko // Low Temperature Physics – 2007 – v. 33. – №2. – P. 291–294.

[A4] Орлов, М.Л. Механизмы выпрямления высокочастотного сигнала полевым гетеротранзистором с коротким каналом / М.Л. Орлов. // ФТП. – 2008. – т. 42. – №3 – С. 346–352.

[A5] Орлов, М.Л. Выходные характеристики короткоканального полевого транзистора InGaAs/InAlAs с двумерным электронным газом и особенности генерации им терагерцового излучения. / М.Л. Орлов. // Изв. РАН, Серия Физическая. – 2009. - Т.73. - №1.- С.115-118.

[A6] Орлов, М.Л. Механизмы отрицательного сопротивления и генерации терагерцового излучения короткоканальным транзистором $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$. / М.Л.Орлов, Л.К.Орлов. // ФТП.-2009.- Т.43.-№5.- С.679-688.

[A7] Орлов, М.Л. Механизмы и особенности детектирования излучения субмиллиметрового диапазона длин волн полевыми транзисторами с коротким двумерным каналом./ М.Л.Орлов, А.Н.Панин, Л.К.Орлов.// ФТП.-2009.- Т.43.- №6.-С.816-824.

[A8] Orlov, M.L. Mechanisms of a negative differential conductivity in a shortchannel $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.47}\text{As}$ HEMT / M.L. Orlov. // Journal of Physics: Conference Series.- 2009.-193.-012020.-С.1-4.

[A9] Orlov, M.L. Detection mechanisms of terahertz radiation in a short gate $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.47}\text{As}$ field effect transistor / M.L. Orlov and L.K. Orlov // Journal of Physics: Conference Series.- 2009.-193.-012080.-С.1-4.

[A10] Romanov, Yu.A. Anisotropy of the conductivity and high-frequency characteristics of two-dimensional quantum superlattices in a strong electric field / Yu.A. Romanov, M.L. Orlov. // Proceed. of International Symposium «NANOSTRUCTURES: Physics and Technology» St Petersburg, 21–25 June 2004. – P. 292–293.

[A11] Orlov, M.L. Peculiarities of the current installed in two-dimensional superlattices with a finite width / M.L. Orlov, Yu.A. Romanov, L.K. Orlov // Proceed. of the First Int. Workshop on Semiconductor Nanocrystals, SEMINANO2005 Sept.10–12 2005, Budapest, Hungary – v. 2. – P. 325–328.

[A12] 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. // Proc. 15th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”, Novosibirsk, Russia, June 25–29 2007. – С. 143-144.

[A13] 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, Н. Дьяконова, W. Кнап, А. Shchepetov, Y. Roelens, S. Bollaert. // Материалы симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника», Н.Новгород, 10 – 14 марта 2007 г., ИФМ РАН. – С. 545–546.

[A14] Орлов, М.Л. Выходные характеристики $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ короткоканального полевого транзистора с двумерным электронным газом и

особенности генерации им терагерцового излучения. / М. Л. Орлов, W. Кнап // Материалы симпозиума «Нанозфизика и нанозлектроника», Н.Новгород, 10 – 14 марта 2008г. - ИФМ РАН. - Т.2.– С.335-336.

[A15] Orlov, M. L. Output characteristics and terahertz radiation from the InGaAs/InAlAs transistor with the short 2D-quantum transport channel. / M. L. Orlov, Yu.A.Romanov, L.K.Orlov, W.Knap. // Proceed 3-th Int. Conf. Physics of Electronic Materials. Kaluga, Russia, 1-4 October.- 2008.- V.1.- P.209-212.

[A16] Orlov, M. L. Mechanisms of a negative differential conductivity in a short-channel $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.47}\text{As}$ HEMT / M.L. Orlov // Proceed. Of 16th International conference on electron dynamics in semiconductors, optoelectronics and nanostructures, Montpellier, France, 24-28 august 2009 - P. 94.

[A17] Orlov, M.L. Detection mechanisms of terahertz radiation in a short gate $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.47}\text{As}$ field effect transistor / M.L. Orlov and L.K. Orlov // Proceed. Of 16th International conference on electron dynamics in semiconductors, optoelectronics and nanostructures, Montpellier, France, 24-28 august 2009 - P. 134.

[A18] Orlov, M.L. Anisotropy of the conductivity and high-frequency characteristics of two-dimensional quantum superlattices in a strong electric field / M.L. Orlov, Yu.A. Romanov, L.K. Orlov. // Abstr. 5th Int.Conf.Low Dimensional Structures and Devices, Cancun, Mexico. 12 - 17 December. - 2004. - P. N117.

[A19] Orlov, M.L. Nonresonant detection of THz radiation in InGaAs HEMT at room temperature / M.L. Orlov, F. Teppe, W. Knap, A. El Fatimy, J. Lusakowski, S. Bollaert, A. Cappy // Abstr. Int. Conf. Micro- and Nanoelectronics-2005, Zvenigorod-Lipki, Moscow distr., 03-07 October. – 2005. – P. P2-22.

[A20] Orlov, M.L. Room temperature tunable detection of sub-terahertz radiation by plasma waves in nanometer InGaAs transistors. / M. Orlov, F. Teppe, A. El Fatimy, A. Tiberj, W. Кнап, J. Torres, V. Gavrilenko, A. Shchepetov, S. Bollaert. // Abstr. GDR-E THz school “Semiconductor Sources and Detectors of THz radiation”, Bombannes, France, 1-2 June. - 2007.- P. 54.

[A21] Орлов, М.Л. Нерезонансное детектирование ТГц излучения GaInAs HEMT при комнатной температуре. / М.Л. Орлов, Ф. Терре, W. Кнап, А.Ел Фатиму, J. Lusakowski, S. Bollaert, A. Cappy. // Тезисы докладов VII Российской конференции по физике полупроводников. Москва, 18-23 сентября. – 2005. – С. 321.

[A22] 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, Ф. Терре, N. Dyakonova, W. Кнап, A. Shchepetov, Y. Roelens, S. Bollaert. // Тезисы докладов “Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн”. Н.Новгород, ИПФ РАН, 12 - 15 марта. – 2007. - С. 38-39.

[A23] Орлов, М.Л. Выходные характеристики и особенности генерации ТГц излучения полевым транзистором с двумерным электронным газом / М.Л. Орлов, А. el Fatimy, К. Маремьянинов, А. Антонов, Н. Дьяконова, W. Кнап, В.И. Гавриленко, А. Шепетов, S. Bollaert, A. Cappy // Материалы 8-ой российской конференции по физике полупроводников «Полупроводники 2007». Екатеринбург, 30 сентября – 5 октября 2007 г. – С. 233.

[A24] Орлов, М.Л. Механизмы детектирования субмиллиметрового излучения короткоканальными полевыми транзисторами / Орлов М.Л. // Тезисы докладов IX

Российской конференции по физике полупроводников «Полупроводники 2009», Новосибирск-Томск, 28 сентября - 3 октября 2009 г - С. 251.

[A25] Орлов, М.Л. Особенности транспорта горячих двумерных электронов в канале короткоканального InGaAs/InAlAs полевого транзистора / Орлов М.Л., Орлов Л.К. // Тезисы докладов Юбилейной X всероссийской молодежной школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества, Екатеринбург, 9-15 ноября - 2009 г. - С.110-111.

Орлов Михаил Львович

ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ, ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И
ДЕТЕКТИРОВАНИЕ В ТРАНЗИСТОРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С
КОРОТКИМ ДВУМЕРНЫМ КАНАЛОМ

Автореферат

Подписано к печати 1 июля 2010 г. Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН
603950, Нижний Новгород, ГСП-105