

На правах рукописи

Петров Александр Сергеевич

**Дрейфовые неустойчивости плазменных волн в
двумерных электронных системах**

**Специальность: 01.04.07 – Физика
конденсированного состояния**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Москва – 2022

Работа выполнена в центре фотоники и двумерных материалов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Свинцов Дмитрий Александрович,

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук

Защита состоится 22.06.2022 в 11:00 на заседании диссертационного совета ЛФИ.01.04.07.013 по адресу 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) <https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-fiziko-matematicheskie-nauki.php>

Ученый секретарь
диссертационного совета, Кузьмичев Павел Константинович
к.ф.-м.н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Терагерцовый (ТГц) диапазон – это следующий рубеж электроники и оптоэлектроники с потенциальными приложениями от визуализации, космической связи, вычислений, контроля качества и внутренней безопасности до биотехнологии и медицины [1-4]. На ТГц частотах инерция электронов становится важной, обеспечивая задержку между приложенным напряжением и скоростью (током) электронов. Когда столкновения электронов с примесями и колебаниями решетки нечасты, эта задержка приводит к колебаниям электронной плотности (называемым плазменными волнами или плазмонами) в ограниченных двумерных каналах, служащими резонансными полостями для плазменных волн. В режиме с преобладанием столкновений плазменные волны чрезмерно затухают, но все же играют роль, резко меняя распределение электронов в каналах устройства на ТГц частотах. Резонансный режим можно использовать для как для генерации, так и для детектирования ТГц излучения [5;6]. И резонансные, и затухающие плазменные волны позволяют использовать другие электронные устройства ТГц диапазона, такие как детекторы, смесители и фазовращатели [7]. Для продвижения терагерцовых технологий в повседневную жизнь необходимо развивать как элементную базу (терагерцовые источники, детекторы, транзмиттеры), так и теоретические подходы к описанию этих приборов.

К примеру, одним из перспективных типов приборов терагерцовой плазмоники являются субмикронные транзисторы на основе двумерных электронных систем (ДЭС). Они могут применяться как приёмник или транзмиттер, а также и как источник ТГц излучения. Так, в присутствие продольного электрического поля носители заряда в ДЭС приобретают направленную дрейфовую скорость, и если эта скорость превышает некоторое пороговое значение, двумерная плазма становится неустойчивой относительно самовозбуждения плазменных колебаний [8]. Далее за счёт радиационного затухания энергия плазменных колебаний преобразуется в ТГц излучение, что наблюдалось как в транзисторах с одним затвором [5], так и в устройствах с периодической вариацией плотности носителей в канале [9] (плазмонных кристаллах) при комнатной температуре.

Таким образом, дрейфовые неустойчивости являются одним из актуальных механизмов генерации ТГц излучения и достаточно изучены к настоящему моменту. В то же время, несмотря на значительное количество работ по данной тематике, большинство из них сосредотачиваются на предсказании свойств конкретных структур: например, изучались

дрейфовые неустойчивости в транзисторах, полностью покрытых затвором [8], транзисторах без затвора [10], транзисторах с заглушкой [11], плазмонных кристаллах с симметричной элементарной ячейкой [12] и т.д. В то же время вопрос о том, являются ли исследованные типы структур оптимальными для генерации плазмонов, остаётся открытым.

Обсуждение выше относится к возбуждению поверхностных плазменных мод в транзисторах. Однако не менее интересны и краевые моды, обладающие хиральными свойствами [13;14], высокой концентрацией электрического поля и потенциально менее диссипативные по сравнению с поверхностными модами [15]. Теоретическое описание краевых мод опирается на более сложный математический аппарат и потому весьма скудно представлено в литературе [13-17]. Таким образом, качественное и обширное описание краевых плазменных мод является одним из вызовов для ТГц плазмоники.

Более того, добавление дополнительного внешнего воздействия на уже исследованную систему (например, помещение устройства в магнитное поле или подача переменного сигнала на затвор транзистора) обычно приводит к необходимости построения принципиально новой теории, которая может быть кратно сложнее исходной. Например, теоретическое описание краевого магнитоплазмона даже в минимальной модели является нетривиальной задачей, т.к. требует применения хоть и известного в литературе, но весьма громоздкого метода решения интегро-дифференциальных уравнений типа Винера-Хопфа [15]. При этом исследование влияния вязкости двумерного электронного газа на спектр этой моды требует заметно более глубоко погружения в математические тонкости [18] и исключает возможность проведения быстрых оценок. Налицо потребность в некоторой теории, подобной теории возмущений в квантовой механике [19] или электродинамике [20], позволяющей исследовать влияние различных эффектов на основе решения базовой задачи.

Выше перечислены лишь немногие вызовы современной терагерцовой плазмоники. Преодоление этих вызовов является актуальной задачей, и данная работа направлена на частичное решение обозначенных проблем.

Цель работы. Целью диссертационной работы является изучение влияния дрейфа на плазменные колебания (в основном, терагерцовые) в двумерных электронных системах. А именно: выявление новых типов дрейфовых неустойчивостей в двумерных электронных системах; построение теории возмущений для терагерцовых плазменных эффектов в

ДЭС; систематизация уже имеющихся знаний и выявление общих закономерностей во влиянии дрейфа на терагерцовые плазменные колебания в ДЭС.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Показать, что в плазмонных кристаллах с элементарной ячейкой, частично покрытой затвором, возможно возникновение плазменной неустойчивости.
2. Построить аналог квантово-механической теории возмущений для плазменных эффектов в ДЭС, позволяющий пертурбативно описывать влияние следующих возмущений на спектр плазменных волн: дрейф носителей заряда, внешнее магнитное поле, вязкость, столкновительное затухание.
3. С помощью построенной теории возмущений выявить общие закономерности влияния постоянного тока на спектр плазменных волн в каналах полевых транзисторов.
4. С помощью построенной теории возмущений исследовать возможность самовозбуждения магнитоплазмонов на краю ДЭС с различной плотностью носителей и протекающим поперечным постоянным током.

Научная новизна.

1. Впервые предсказана возможность возникновения дрейфовой неустойчивости в каналах плазмонных кристаллов с элементарной ячейкой, частично покрытой затвором.
2. Впервые построен аналог квантово-механической теории возмущений для плазменных эффектов в ДЭС, позволяющий пертурбативным образом учитывать влияние возмущений (дрейф носителей заряда, внешнее магнитное поле, вязкость, столкновительное затухание) на исходную плазменную моду.
3. На основании данной теории впервые показана необходимость асимметричности устройств на основе ДЭС для беспорогового возбуждения плазменных волн.
4. Впервые показано, что пропускание постоянного тока перпендикулярно границе двух ДЭС с различными плотностями носителей во внешнем магнитном поле может привести к возбуждению межкрасовой магнитоплазменной моды на этой границе.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Постоянный ток в транзисторных структурах на основе двумерных электронных систем, покрытых решетчатым затвором, является неустойчивым относительно генерации плазменных

волн, начиная с некоторого критического значения. Согласно развитой теории, основанной на уравнениях электронной гидродинамики, критическая скорость дрейфа электронов для достижения генерации в гетероструктурах на основе InAs при комнатной температуре имеет порядок $3 \cdot 10^5$ м/с, и является экспериментально достижимой.

2. Возможно построение последовательной теории возмущений для вычисления спектров и распределений поля двумерных плазмонов. В построенной теории нулевым приближением является решение спектральной задачи для плазмона в локальной друдевской модели электропроводности, а роль возмущений могут играть дрейф носителей заряда, внешнее магнитное поле, электронная вязкость, рассеяние носителей заряда, а также изменение граничных условий.
3. Необходимым, а в случае отсутствия диссипации и достаточным, условием для возникновения гидродинамической неустойчивости плазменных волн в транзисторах с двумерным каналом является отсутствие центра инверсии у структуры.
4. Пропускание постоянного тока перпендикулярно границе двумерных электронных систем с различными плотностями носителей во внешнем магнитном поле может привести к возбуждению межкраевой магнитоплазменной моды на этой границе. Темп роста данной плазменной неустойчивости пропорционален разности концентраций носителей заряда в двух соседних областях, не зависит от волнового вектора в слабых магнитных полях и квадратичен по волновому вектору в сильных магнитных полях. Критическая скорость дрейфа электронов для наблюдения данной неустойчивости в гетероструктурах на основе арсенида галлия является экспериментально достижимой при температурах порядка и менее 80 К и магнитных полях порядка и более 10 Т.

Практическая значимость работы состоит в предсказании новых терагерцовых плазменных эффектов в двумерных электронных системах, которые могут найти применение в источниках и транзмиттерах терагерцовых сигналов. Этими эффектами являются: возбуждение межкраевого магнитоплазмона постоянным током; возбуждение плазменных колебаний постоянным током в плазмонном кристалле с решетчатым затвором с пороговой скоростью ниже скорости плазменных волн.

Теоретическая значимость работы состоит в построении аналога квантово-механической теории возмущений для плазменных эффектов в ДЭС, позволяющей приближённо описывать влияние внешних возмущений, таких как дрейф носителей заряда, внешнее магнитное поле,

вязкость электронного газа, столкновительное затухание, вариация граничных условий, на плазменные моды в ДЭС.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием экспериментально проверенных приближений, качественным сравнением предсказаний построенных теорий с экспериментальными данными и количественным сравнением предсказаний построенных теорий с теоретическими предсказаниями других авторов.

Апробация работы. Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались на следующих профильных российских и международных конференциях:

- Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental and Applied Problems of Terahertz Devices and Technologies, 2016, Sendai, Japan;
- XXI Международный симпозиум Нанофизика и нанoeлектроника, 2017, Нижний Новгород;
- Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2017, Санкт-Петербург;
- 60-ая научная конференция МФТИ с международным участием, 2017, Долгопрудный;
- Международная конференция-конкурс молодых физиков, 2018, Москва;
- XX Всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и нанoeлектронике, 2018, Санкт-Петербург;
- 26th International Symposium Nanostructures: Physics and Technology, 2018, Минск, Беларусь;
- International Conference on Metamaterials and Nanophotonics METANANO 2018, Сочи;
- Surface Plamon Photonics-9, 2019, Копенгаген, Дания;
- XIV Российская конференция по физике полупроводников, 2019, Новосибирск;
- 2D Materials 2019: International Congress on Graphene, 2D Materials and Applications, 2019, Сочи;
- International Conference on Metamaterials and Nanophotonics METANANO 2020, онлайн;
- Nanophotonics of 2D Materials 2020, онлайн;
- International Conference on Metamaterials and Nanophotonics METANANO 2021, онлайн;
- EP2DS–24/MSS–20 Joint Conference, 2021, онлайн.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 4 печатные работы. Из них 4 статьи в зарубежных журналах, входящих в базы цитирования Scopus и Web of Science.

Структура работы. Диссертация состоит из 3 глав, основные результаты которых изложены в статьях [I-IV]. Статьи [II-IV] опубликованы в рецензируемом международном журнале Physical Review B, включённом в библиографические базы Scopus и Web of Science. Полный объём диссертации составляет 107 страниц, включая 14 рисунков и 0 таблиц. Список литературы содержит 110 наименований, из которых 6 работ опубликованы автором лично или в соавторстве.

Личный вклад соискателя. Общая постановка задач осуществлялась научным руководителем автора Свинцовым Д. А. Коллеги автора, участвовавшие в обсуждении методов и результатов исследования, указаны в работах [I-VI] в качестве соавторов. Все результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, указаны ее цели, научная новизна, практическая значимость, структура и объём.

В **первой главе** диссертации дан обзор текущего состояния исследований в области дрейфовых неустойчивостей плазменных волн в ДЭС и исследован новый вид такой неустойчивости в плазмонном кристалле (бесконечном двумерном электронном газе, находящемся под периодическим затвором) с дифракционной решёткой в качестве затвора (см. рис. 1А).

До недавнего времени основным теоретическим средством, используемым для объяснения экспериментов по наблюдению ТГц эмиссии из транзисторных структур, являлась модель плазменных неустойчивостей Дьяконова-Шура (ДШ) [8] в полностью гейтированном транзисторе. Согласно этой модели, уже при небольшой скорости дрейфа носителей малое возмущение электронной плотности в канале способно испытывать усиленное отражение от стокового контакта, что и приводит к нарастанию колебаний. Однако несмотря на свою простоту и согласие со многими экспериментами, эта теория всё же не лишена недостатков. К примеру, в ней предполагается подключение источника постоянного между стоком и истоком прибора, что не соответствует реальным экспериментальным схемам, в которых всегда используются источники постоянного напряжения.

Важным обобщением работы ДШ является то, что усиленное отражение плазмона происходит не обязательно от стокового контакта транзистора, а от границы между открытой и подзатворной областями (о/п границы, рис. 1Б); при этом последняя по-прежнему играет роль резонатора для плазменных колебаний. Разумеется, из-за частичного проникновения энергии колебаний в открытую область коэффициент отражения плазменной волны от этой границы несколько меньше, чем в случае Дьяконова и Шура, однако по-прежнему может превзойти единицу уже при малых скоростях дрейфа (много меньше скорости плазменных волн и скорости насыщения), как мы показываем в работе [IV].

Далее было решено попробовать перенести методики, разработанные для однозатворных структур, на многозатворные. В контексте этой задачи было предварительно проведено изучение применимости метода трансфер-матриц для расчёта плазмонов в транзисторных структурах. Ранее [21] метод уже использовался при анализе свойств фотонных кристаллов, что делает его интересным для исследования плазменных волн в плазмонном кристалле.

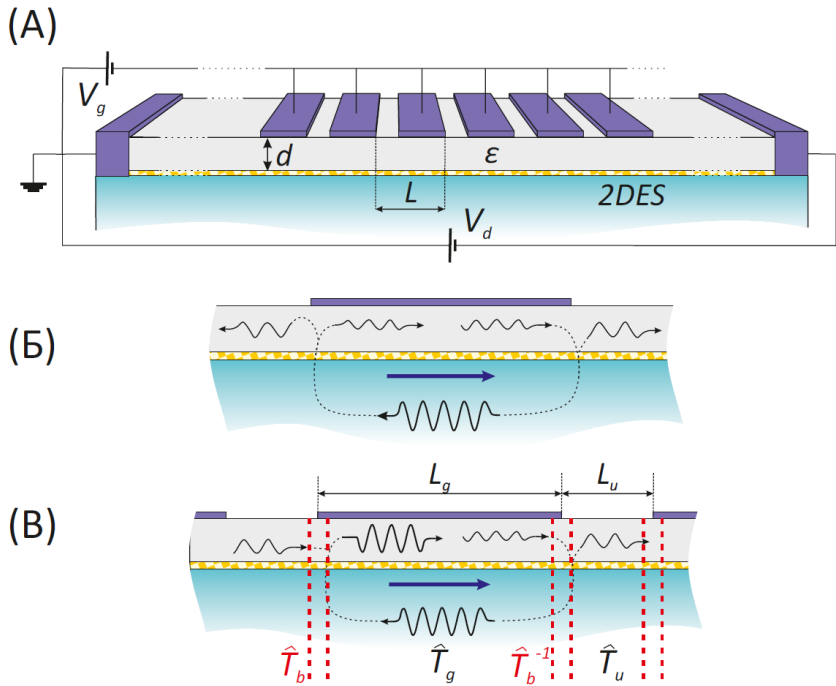


Рис. 1 — (А) Схематичное изображение транзисторной структуры с двумерным каналом, покрытой решетчатым затвором. (Б, В) Схематичное изображение отражений плазменной волны (Б) под изолированным затвором и (В) в многозатворной структуре. Отражение от правой границы приводит к усилению волны при наличии потока, тогда как отражение от левой — к её затуханию в случае (Б). Однако это затухание может быть скомпенсировано (В) плазменной волной, падающей на левую границу из соседней ячейки кристалла. Особенно эффективная компенсация происходит при совпадении фаз (см. ниже). Символы $\hat{T}_b$, $\hat{T}_g$, $\hat{T}_b^{-1}$, $\hat{T}_u$ обозначают трансфер-матрицы, описывающие распространение плазменных волн в различных частях плазмонного кристалла. Индекс b (boundary) соответствует прохождению плазмона через границу между открытой и подзатворной областями канала, индекс g означает подзатворную область, индекс u — открытую.

На основании метода трансфер-матриц и теоремы Блоха было установлено общее дисперсионное уравнение для бегущих плазменных волн в плазмонном кристалле без привязки к конкретной модели электронного транспорта и граничным условиям. Также в общем виде были выявлены математические условия, при которых зарождается неустойчивость. Для количественного описания эффекта мы использовали самосогласованные уравнения гидродинамики и электростатики; в качестве граничных условий на о/п границы было взято постоянство потенциала.

В результате наш анализ показал, что плазменная мода становится неустойчивой в тот момент, когда вертикальный зазор (иначе, устойчивое антипересечение) в спектре плазмонного кристалла сменяется горизонтальным (неустойчивым антипересечением, см. рис. 2). В таком случае возникает ненулевая мнимая часть у плазменной частоты, что соответствует нарастанию/затуханию плазменных волн. При этом пороговая скорость, при которой возникает неустойчивость, может быть оценена по формуле $u_{th} = s|1 - 4\pi d/\lambda|$, где s – скорость плазменных волн в подзатворной области, λ – длина волны плазмона в подзатворной области, d – толщина подзатворного диэлектрика. Обычно $\lambda \gg d$, однако большой множитель 4π приближает отношение d/λ к единице, что может обеспечить крайне низкие пороговые скорости.

Примечательно, что условия максимизации темпа роста неустойчивости могут быть выведены аналитически. Как видно из рис. 2, максимум достигается в центре неустойчивой области (относительно блоховской фазы), причём значение инкремента в максимуме зависит от собственной частоты по некоторому гладкому огибающему закону. Нам удалось найти математические условия для максимизации инкремента, которые с физической точки зрения аналогичны известным антиотражательным условиям для оптических плёнок: фаза волны, отражённой от о/п границы, должна отставать на полпериода от фазы волны, прошедшей сквозь о/п границу, затем отражённой от п/о границы и далее прошедшей сквозь п/о границу.

Таким образом, была поставлена и решена задача о нахождении плазмонной моды, обладающей максимальным инкрементом среди всех бегущих волн в системе; на основании полученного решения были проведены оценки осуществимости возбуждения плазменных колебаний в плазмонных кристаллах при комнатной температуре, которые позволили предсказать возможность ТГц генерации при комнатной температуре из структур на основе арсенида индия, антимонида индия, а также арсенида галлия.

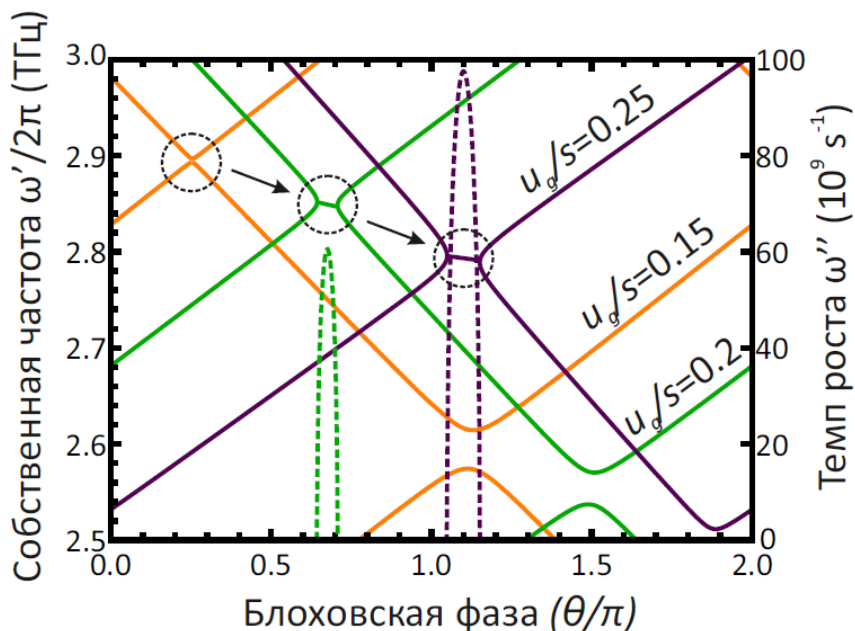


Рис. 2. Дисперсионные кривые $\omega'(\theta)$ (сплошные линии, левая шкала) и темпы роста плазменных волн $\omega''(\theta)$ (пунктир, правая шкала) рассчитанные для ДЭС на основе GaAs с решетчатым затвором при разных дрейфовых скоростях u_d в подзатворной области (нормированных на s — скорость плазменных волн). Неустойчивость зарождается при переходе от устойчивого антипересечения при $u_d/s = 0.15$ через слияние дисперсионных кривых ($u_d/s \approx 0.17$) к неустойчивому антипересечению ($u_d/s = 0.2$). Порог неустойчивости $u_{th} \approx 0.17s$. Пунктирные окружности отмечают трансформацию типа пересечения дисперсионных кривых.

Выявление значительной роли о/п границы в возникновении и развитии плазменных неустойчивостей вызвало необходимость в уточнении граничного условия, которому подчиняются электроны при её пересечении. При расчётах нами использовалось несколько упрощённое условие постоянства квазиуровня Ферми, и теперь была обоснована его применимость. Так, расхождение коэффициентов отражения плазмона от указанной границы, рассчитанных с использованием простого граничного условия и на основе микроскопического вычисления тока, не превосходит 10% в широком диапазоне частот и скоростей потока. Это обосновывает применимость ГУ постоянства квазиуровня Ферми во всех разработанных нами моделях и позволяет намного дальше продвинуться в аналитических выкладках.

Вторая глава является ядром диссертационной работы и посвящена построению теории возмущений для гидродинамических плазменных эффектов в ДЭС.

Теории возмущений хорошо известны в различных областях физики, в частности, в квантовой механике [19] и электродинамике [20]. Наш подход заключается в применении методов теории возмущений к новому объекту — самосогласованной системе уравнений электронной гидродинамики и электростатики. Перенос известного метода на уравнения данные уравнения является нетривиальным: в квантовой механике, являющейся привычной средой для применения теории возмущений, гамильтониан исходной системы почти всегда эрмитов — в отличие от электронной гидродинамики. Эрмитовость гамильтониана обеспечивает ортогональность собственных состояний системы, что легко позволяет выписать поправки к энергии в первом порядке теории возмущений в квантово-механических задачах. В нашем случае матрица системы гидродинамических уравнений принципиально неэрмитова, что ставит дополнительные сложности на пути к построению теории.

В разделе 2.1 мы приводим два эквивалентных способа построения искомой теории возмущений. Первый способ основывается на операторном подходе к самосогласованной системе уравнений электронной гидродинамики и электростатики. В этом случае неэрмитовость матрицы невозмущённой задачи требует домножения исходной системы на истинный гамильтониан $\hat{H}$ двумерного электронного газа, диагональные элементы которого суть энергия плазменных мод. После этого оператор полученной таким образом новой невозмущённой задачи уже является эрмитовым, и теория возмущений легко формулируется. С помощью этой теории становится возможным вычисление поправок к спектру плазменных волн в двумерных электронных системах с произвольной конфигурацией электродах и граничных условиях на них. Выражение для такой поправки в общем виде записывается так:

$$\delta\Omega_\lambda = \frac{\langle \Phi | \hat{H} \hat{V} \Phi \rangle}{\langle \Phi | \hat{H} \Phi \rangle}, \quad (1)$$

где $\delta\Omega_\lambda$ — поправка к собственной частоте плазмона Ω_λ в отсутствие возмущения, Φ — вектор собственных мод невозмущённой задачи, $\hat{V}$ — оператор возмущения, λ — индекс плазменной моды.

Второй подход к вычислению поправки $\delta\Omega_\lambda$ — энергетический. Он основывается на преобразовании исходной системы уравнений к энергетическому виду, подобно уравнению Рейнольдса-Орра в теории неустойчивостей несжимаемых жидкостей [22].

Построенная теория позволяет исследовать различные влияния на ДЭС в самом общем виде. В диссертационной работе рассмотрено её

применение к дрейфовым неустойчивостям в ДЭС. Так, долгое время эти неустойчивости исследовались «вслепую», без каких-либо ориентиров: не было общего понимания, поддерживает ли данная структура полевого транзистора неустойчивость или нет. В то же время и теоретические работы, и экспериментальные данные [5; 23; 24] намекают, что структурная асимметрия каким-то образом способствует неустойчивости.

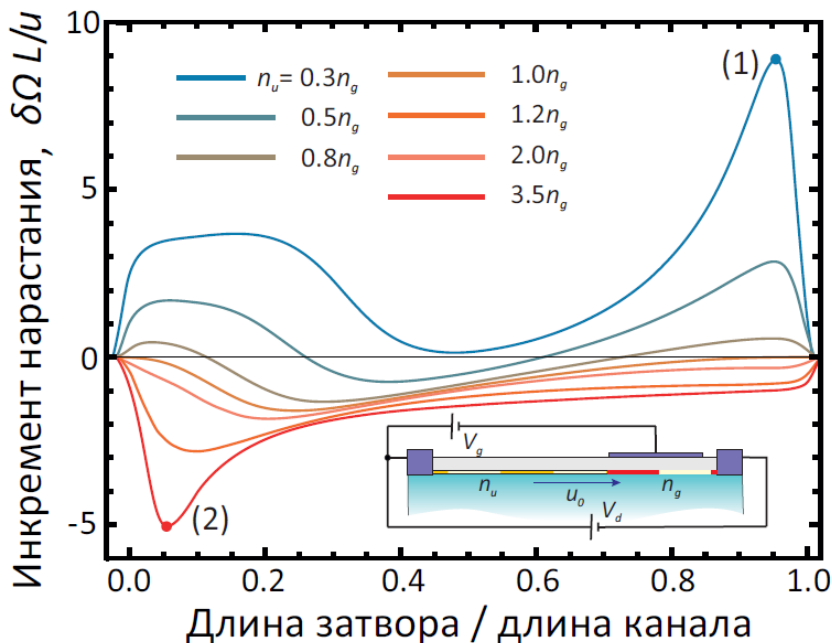


Рис. 3. Вычисленные инкременты нарастания неустойчивости для фундаментальной плазменной моды в полевом транзисторе с частично открытым каналом (показан на вставке) при различных длинах затвора и концентрации носителей. Профиль плотности носителей аппроксимирован сглаженной ступенчатой функцией. Инкременты нарастания нормированы на u_0/L , где u_0 — дрейфовая скорость на стоке (одинакова для всех кривых), плотность носителей на стоке также зафиксирована. При инверсии полярности напряжения исток-сток (что равносильно изменению направления дрейфа) кривые зеркально отражаются относительно горизонтальной оси. Неустойчивость предпочтительно развивается, если поток направлен из обеднённой в обогащённую область и особенно проявляется, если обеднённая область короткая и не покрыта затвором (ср. точки 1 и 2).

Построенная теория возмущений позволяет нам сформулировать критерий плазменной неустойчивости в самом общем виде. С позиций операторного подхода, оператор дрейфа $\hat{V}_{dr}$ в ограниченной ДЭС неэрмитов, а значит, приводит к возникновению мнимой части собственной частоты плазменных колебаний. Собственная частота может остаться действительной лишь при выполнении определённых условий, которые мы устанавливаем в разделе 2.2.

С помощью построенной теории мы вычисляем поправку к собственной частоте плазменных волн в произвольной ограниченной ДЭС, и приходим к выражению

$$\delta\Omega_\lambda = i \frac{j_0[K_\lambda(0) - K_\lambda(L)] - Q_{loss}}{|\Pi_\lambda|}, \quad (2)$$

где j_0 – поток носителей заряда, $K_\lambda(x)$ – плотность кинетической энергии плазменной моды, x – продольная координата в канале, Π_λ – полная энергия плазменной моды, Q_{loss} – потери, в отсутствие вязкости обусловленные действительной частью проводимости ДЭГа, L – длина структуры.

Выражение (2) наглядно показывает, что дрейф в ограниченных структурах приводит к нарастанию/затуханию волн, т.к. поправка $\delta\Omega_\lambda$ является чисто мнимой, причём нарастанию волн соответствует условие $Im \delta\Omega_\lambda > 0$. При этом темп роста плазменных волн зависит исключительно от приконтактных областей, а в симметричных структурах темп роста зануляется, т.к. $f(0) - f(L) = 0$ по определению симметрии для любой характеристики плазмона $f(x)$. Поэтому зеркально-симметричные транзисторные структуры не поддерживают неустойчивые моды, в то время как асимметричные структуры, как правило, поддерживают (в отсутствие диссипации). При этом природа асимметрии может быть крайне разнообразной: она может происходить от асимметричного расположения затвора(ов), неодинаковой нагрузки истока и стока, неоднородной плотности носителей в канале, или комбинации этих и других факторов.

Результат (2) позволяет пойти дальше общих выводов о симметрии и установить требования для максимизации инкремента неустойчивости среди различных конфигураций транзисторных структур. Максимизация инкремента эквивалента максимизации разности плотностей кинетических энергий на истоке и стоке, которые в свою очередь пропорциональны квадрату электрического поля в плазменной волне. Таким образом, мы ожидаем, что ДЭС с (1) высоким электрическим полем и малой плотностью носителей на истоке и (2) низким электрическим полем и высокой плотностью носителей на стоке будут наиболее подходящими для возбуждения плазменных волн постоянным током.

Для проверки этой гипотезы мы разработали симулятор плазменных мод в транзисторе с частично открытым каналом. Исток и сток нашей структуры поддерживают постоянный потенциал, что соответствует типичному экспериментальному подключению контактов к источнику постоянного напряжения; неоднородность распределения носителей в канале создаётся с помощью напряжения исток-затвор. Мы численно решаем самосогласованные уравнения гидродинамики и электростатики для такой структуры и строим на рис. 3 мнимые части собственных частот для множества структур с различной длиной затвора и соотношением плотностей носителей. В соответствии с нашими ожиданиями, максимальный инкремент нарастания (точка 1) достигается для структуры с короткой обеднённой областью, расположенной рядом с истоком. Если мы изменим направление дрейфа (полярность подаваемого напряжения), кривые отразятся относительно горизонтальной оси и новый максимум (точка 2, которая теперь будет сверху, в области инкрементов) окажется ожидаемо ниже из-за экранирования полей затвором. К тому же, рис. 3 иллюстрирует, что обеднённые области не должны быть слишком короткими: в противном случае структура будет всё более стремиться к симметричным предельным случаям транзистора, полностью покрытого затвором или полностью открытой ДЭС — а моды в симметричных структурах, как мы уже выяснили, являются устойчивыми.

Наши выводы подтверждаются экспериментом. Так, первые источники ТГц излучения, основанные на плазменной неустойчивости [23], были симметричны и излучали широкий спектр лишь при гелиевых температурах. Последующие приборы стали заметно асимметричны [5] и позволили пронаблюдать резонансное испускание ТГц волн уже при комнатной температуре. Более того, работа [5] показала, что пороговый ток, при котором прибор начинает излучать, заметно меньше в случае расположения обеднённой части канала вблизи источника, в полном согласии с нашими выводами.

Третья глава посвящена исследованию влияния дрейфа на спектр межкраевых плазменных мод. Развёрнутая теоретическая модель краевых плазмонов в отсутствие дрейфа была представлена Феттером [13] и дала отличное качественное совпадение с экспериментом. В то же время, Феттер полагался на квазилокальную модель электростатики, которая, в частности, не воспроизводит логарифмическую расходимость групповой скорости краевого магнитоплазмона в длинноволновом пределе в сильных магнитных полях. Упомянутая расходимость групповой скорости следует из расходимости двумерного кулоновского потенциала, что нарушается в квазилокальном приближении.

В 1988 году модель Феттера была избавлена от квазилокального приближения; соответствующую теорию построили Волков и Михайлов

(ВМ) [15; 25]. С помощью весьма громоздких выкладок им удалось решить интегро-дифференциальное уравнение типа Винера-Хопфа и получить спектр (меж)краевого магнитоплазмона в точной электростатической модели (уравнение Пуассона без приближений). Подход ВМ уже воспроизводит упомянутую расходимость групповой скорости краевого плазмона, а также уточняет численные коэффициенты в зависимостях, полученных Феттером.

Таким образом, описание краевых плазмонов возможно и предпочтительно проводить в честной электростатической модели, однако её применение всегда связано с вычислительными трудностями: метод Винера-Хопфа ещё более усложняется по сравнению с минимальной моделью, рассмотренной Феттером и ВМ, при учёте дополнительных воздействий на двумерные электроны. Поэтому целесообразным видится применение теории возмущений для учёта новых эффектов на (меж)краевой магнитоплазмон.

Мы применили основной результат теории возмущений (1) к межкраевому магнитоплазмону. Вычисление поправки (1) потребовало привлечения всех математических способностей диссертанта и составляет основное содержание главы 3.

В результате была вычислена зависимость темпа роста плазменной неустойчивости от контраста плотности носителей на границах ДЭС, длины волны плазмона и величины магнитного поля в произвольном диапазоне параметров. Для предельных случаев сильных и слабых магнитных полей получены приближённые аналитические выражения: в слабых полях темп роста плазмона не зависит от магнитного поля и пропорционален произведению волнового вектора на разность концентраций, тогда как в сильных полях зависимость от магнитного поля становится квадратичной, а волновой вектор вклада не даёт.

Примечательно, что неустойчивость развивается беспороговым образом (плазмон нарастает уже при бесконечно малом дрейфе) в чистых системах. Для формулировки вывода о реализуемости найденной неустойчивости в реальных системах, мы сравнили рассчитанный темп роста с темпом затухания, вызванным конечным временем рассеянием носителей на примесях или фононах. При этом мы учли нетривиальную зависимость затухания межкраевого плазмона от эффективного времени рассеяния. Полученные результаты (рис. 4) свидетельствуют о возможности возбуждения межкраевого магнитоплазмона протекающим постоянным током вплоть до 250 К в гетероструктурах GaAs/AlGaAs; правда, для этого потребуются магнитные поля порядка 15 Т. В то же время, возбуждение плазмона является относительно простой задачей при 77 К: для возбуждения 2-мкм плазмона достаточно магнитного поля в 1 Т и скорости дрейфа 10^7 см/с, что в 2 раза меньше скорости насыщения в

двумерном газе в GaAs/AlGaAs гетероструктуре. Частота возбуждаемого плазмона лежит в ТГц диапазоне.

Подчеркнем, что краевую плазменную неустойчивость следует отличать от неустойчивости Дьяконова-Шура. Последняя основывается на избытке энергии, получаемой плазмой у истока транзистора, по сравнению с энергией, теряемой им на стоке, и, следовательно, является чрезвычайно чувствительной к граничным условиям. Напротив, краевая плазменная неустойчивость не зависит от контактных эффектов, так как требуемая передача энергии от постоянного тока к плазмону происходит внутри всей ДЭС (в основном, вблизи скачка концентрации).

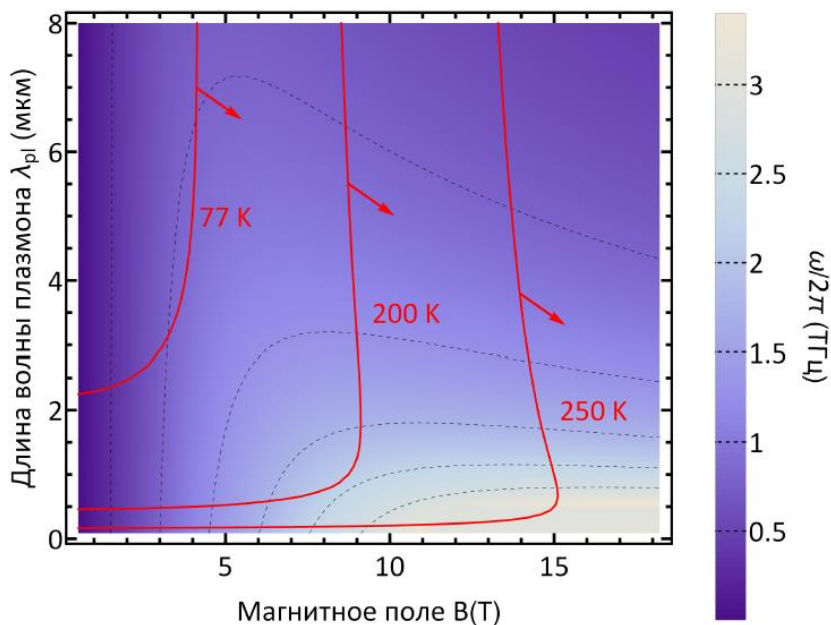


Рис. 4 Цветовая карта дисперсии межкаевого магнитоплазмона с наложенными критическими линиями неустойчивости, рассчитанными при трёх различных температурах для гетероструктуры GaAs/AlGaAs. Плазмоны с параметрами правее и ниже критических линий обладают пороговой скоростью возбуждения неустойчивости меньшей, чем скорость насыщения в арсениде галлия ($\sim 2 \cdot 10^7$ см/с). Концентрации носителей равны $n_i = 10^{-11}$ см $^{-2}$, $n_r = 9 \cdot 10^{-11}$ см $^{-2}$, диэлектрическая проницаемость окружающего пространства 1, времена релаксации при указанных температурах следующие: 5 пс при 77 К, 0.75 пс при 200 К и 0.25 пс при 250 К.

Заключение

Данная работа посвящена влиянию дрейфа носителей заряда на плазменные моды в двумерных электронных системах. В первой главе мы рассмотрели частный случай такого влияния и показали возможность самовозбуждения плазменных волн в плазмонном кристалле с решетчатым затвором при пропускании постоянного тока. Так, в гетероструктуре на основе InAs при комнатной температуре темп роста неустойчивости превосходит столкновительное затухание при скорости дрейфа носителей, равной $3 \cdot 10^5$ м/с, что сравнимо со скоростью насыщения в данных структурах.

Глава 2 является ядром работы: в ней мы построили теорию возмущений для плазмонов в ДЭС, позволяющую пертурбативно учитывать различные воздействия на плазменные моды, такие как: дрейф носителей, столкновительное затухание, вязкость, магнитное поле, вариацию граничных условий и прочие. Теория была построена двумя способами: с помощью квантово-механической аналогии и из энергетических соображений. В представленной работе мы использовали теорию возмущений для исследования влияния дрейфа на плазменные моды в различных конфигурациях и обнаружили, что беспороговое самовозбуждение плазменных мод возможно только в асимметричных транзисторных структурах. При этом нам удалось установить предпочтительные конфигурации транзисторов для возбуждения плазмонов постоянным током: такие транзисторы должны обладать обеднённой открытой областью у истока и обогащённой подзатворной областью у стока.

С помощью построенной теории возмущений мы пертурбативно исследовали влияние дрейфа на межкраевые плазменные моды (глава 3) в точной электростатической модели. Мы показали, что данные моды возможно возбудить беспороговым образом в отсутствие затухания, а с учётом затухания наблюдение такой неустойчивости возможно в гетероструктурах GaAs/AlGaAs при температурах порядка 77K в сильных (10 T) магнитных полях.

Большое количество новых плазменных эффектов в ДЭС может быть обнаружено в материалах, обладающих аномальной холловской проводимостью в отсутствие магнитного поля [14; II; VI]. В подобных системах отношение аномальной (недиагональной) и диагональной проводимостей зачастую является малым параметром, что делает применение теории возмущений более чем оправданным.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- I. Plasma instability of 2D electrons in a field effect transistor with a partly gated channel [Текст] / A. S. Petrov, D. Svintsov, M. Rudenko, V. Ryzhii, M. Shur // International Journal of High Speed Electronics and Systems. — 2016. — Т. 25, 03n04. — С. 1640015.
- II. Amplified-reflection plasmon instabilities in grating-gate plasmonic crystals [Текст] / A. S. Petrov, D. Svintsov, V. Ryzhii, M. S. Shur // Physical Review B. — 2017. — Т. 95, № 4. — С. 045405.
- III. Petrov, A. S. Perturbation theory for two-dimensional hydrodynamic plasmons [Текст] / A. S. Petrov, D. Svintsov // Physical Review B. — 2019. — Т. 99, № 19. — С. 195437.
- IV. Petrov, A. S. Thresholdless excitation of edge plasmons by transverse current [Текст] / A. S. Petrov, D. Svintsov // Physical Review B. — 2020. — Т. 102, № 12. — С. 121402.
- V. Singularity-enhanced terahertz detection in high-mobility field-effect transistors [Текст] / M. Khavronin, A. Petrov, A. E. Kazantsev, E. I. Nikulin, D. A. Bandurin // Physical Review Applied. — 2020. — Т. 13, № 6. — С. 064072.
- VI. Petrov, A. S. Plasmonic excitation for a tunable transmitter without magnetic field immune to backscattering [Текст] / A. S. Petrov // Physical Review B. — 2021. — Т. 104, № 24. — С. L241407.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Security applications of terahertz technology [Текст] / М. С. Кемп [и др.] // Terahertz for Military and Security Applications. Т. 5070. — International Society for Optics, Photonics. 2003. — С. 44—52.
2. Tonouchi, M. Cutting-edge terahertz technology [Текст] / М. Tonouchi // Nature photonics. — 2007. — Т. 1, № 2. — С. 97—105.
3. Saeedkia, D. Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications [Текст] / D. Saeedkia. — Elsevier, 2013.
4. Siegel, P. H. THz technology: An overview [Текст] / P. H. Siegel // Terahertz Sensing Technology: Volume 1: Electronic Devices and Advanced Systems Technology. — 2003. — С. 1—44.
5. AlGaIn/GaN high electron mobility transistors as a voltage-tunable room temperature terahertz sources [Текст] / A. El Fatimy [и др.] // Journal of applied Physics. — 2010. — Т. 107, № 2. — С. 024504.
6. Resonant terahertz detection using graphene plasmons [Текст] / D. A. Bandurin [и др.] // Nature communications. — 2018. — Т. 9, № 1. — С. 1—8.
7. Dyakonov, M. Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid [Текст] / M. Dyakonov, M. Shur // IEEE transactions on electron devices. — 1996. — Т. 43, № 3. — С. 380—387.
8. Dyakonov, M. Shallow water analogy for a ballistic field effect transistor: New mechanism of plasma wave generation by dc current [Текст] / M. Dyakonov, M. Shur // Physical review letters. — 1993. — Т. 71, № 15. — С. 2465.
9. Room-temperature amplification of terahertz radiation by grating-gate graphene structures [Текст] / S. Boubanga-Tombet [и др.] // Physical Review X. — 2020. — Т. 10, № 3. — С. 031004.
10. Dyakonov, M. Current instability and plasma waves generation in ungated two-dimensional electron layers [Текст] / M. Dyakonov, M. S. Shur // Applied Physics Letters. — 2005. — Т. 87, № 11. — С. 111501.
11. Aizin, G. Current-driven Dyakonov-Shur instability in ballistic nanostructures with a stub [Текст] / G. Aizin, J. Mikalopas, M. Shur // Physical Review Applied. — 2018. — Т. 10, № 6. — С. 064018.
12. Kachorovskii, V. Y. Current-induced terahertz oscillations in plasmonic crystal [Текст] / V. Y. Kachorovskii, M. Shur // Applied Physics Letters. — 2012. — Т. 100, № 23. — С. 232108.
13. Fetter, A. L. Edge magnetoplasmons in a bounded two-dimensional electron fluid [Текст] / A. L. Fetter // Physical Review B. — 1985. — Т. 32, № 12. — С. 7676.
14. Song, J. C. Chiral plasmons without magnetic field [Текст] / J. C.

- Song, M. S. Rudner // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 2016. — Т. 113, № 17. — С. 4658—4663.
15. Волков, В. Краевые магнетоплазмы: низкочастотные слабозатухающие возбуждения в неоднородных двумерных электронных системах [Текст] / В. Волков, С. Михайлов // *ЖЭТФ*. — 1988. — Т. 94. — С. 217.
 16. Dyakonov, M. Boundary instability of a two-dimensional electron fluid [Текст] / M. Dyakonov // *Semiconductors*. — 2008. — Т. 42, № 8. — С. 984—988.
 17. Nonretarded edge plasmon-polaritons in anisotropic two-dimensional materials [Текст] / D. Margetis [и др.] // *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*. — 2020. — Т. 53, № 5. — С. 055201.
 18. Cohen, R. Hall and dissipative viscosity effects on edge magnetoplasmons [Текст] / R. Cohen, M. Goldstein // *Physical Review B*. — 2018. — Т. 98, № 23. — С. 235103.
 19. Schrodinger, E. Quantisierung als eigenwertproblem [Текст] / E. Schrodinger // *Annalen der physik*. — 1926. — Т. 385, № 13. — С. 437—490.
 20. Waldron, R. Perturbation theory of resonant cavities [Текст] / R. Waldron // *Proceedings of the IEE-Part C: Monographs*. — 1960. — Т. 107, № 12. — С. 272—274.
 21. Pendry, J. Photonic Band Structures [Текст] / J. Pendry // *Journal of Modern Optics*. — 1994. — Т. 41, № 2. — С. 209—229.
 22. Ландау, Л. Д. Гидродинамика [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — Наука, 1986.
 23. Terahertz emission by plasma waves in 60 nm gate high electron mobility transistors [Текст] / W. Кнар [и др.] // *Applied Physics Letters*. — 2004. — Т. 84, № 13. — С. 2331—2333.
 24. Room-temperature terahertz emission from nanometer field-effect transistors [Текст] / N. Dyakonova [и др.] // *Applied Physics Letters*. — 2006. — Т. 88, № 14. — С. 141906.
 25. Mikhailov, S. Inter-edge magnetoplasmons in inhomogeneous two-dimensional electron systems [Текст] / S. Mikhailov, V. Volkov // *Journal of Physics: Condensed Matter*. — 1992. — Т. 4, № 31. — С. 6523.