

На правах рукописи

ХУСАИНОВ Тимур Айратович

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛНОВЫХ ПУЧКОВ
В НЕОДНОРОДНОЙ МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ**

01.04.08 – физика плазмы

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

Нижний Новгород – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Научный руководитель:

Шалашов Александр Геннадиевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий сектором, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Официальные оппоненты:

Савелий Максимович Грач, доктор физико-математических наук, профессор кафедры распространения радиоволн и радиоастрономии, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ)

Алексей Юрьевич Попов, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук» (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)

Защита состоится «__» июня 2017 г. в __ часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН.
Автореферат разослан «__» апреля 2017 г.

И. о. ученого секретаря
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



А. И. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Предмет исследования и актуальность темы

Микроволновое излучение широко используется для нагрева и диагностики плазмы в исследованиях управляемого термоядерного синтеза (УТС). Это связано с успехами в развитии мощных источников миллиметрового излучения (гиротронов) [1], линий передачи излучения, а также квазиоптических систем управления излучением внутри вакуумной камеры. Наиболее распространенная схема нагрева использует электромагнитные волны, поглощающиеся в условиях электронного циклотронного (ЭЦ) резонанса. Однако в современном эксперименте все чаще стали реализовываться режимы удержания, в которых плотность в центральных областях плазменного шнура превышает критическое значение для распространения электромагнитных волн. В установках с малым аспектным отношением (сферических токамаках) резонансное поглощение электромагнитных волн может также оказаться неэффективным, поскольку из-за низкого значения магнитного поля поглощение удастся реализовать только на достаточно высоких циклотронных гармониках [2]. Одна из возможностей по преодолению указанных трудностей связана с линейной трансформацией электромагнитных волн миллиметрового диапазона в квазиэлектростатические бернштейновские волны, которые свободно распространяются в закритической плазме и эффективно поглощаются плазмой в широком диапазоне циклотронных гармоник. Поскольку рассматриваемые квазиэлектростатические колебания не существуют в вакууме, возникает отдельная проблема возбуждения этих колебаний внешним излучением. В электронном циклотронном (ЭЦ) диапазоне частот наиболее естественным представляется ввод внешнего излучения в плазму в виде квазиоптического пучка электромагнитных волн, при этом возбуждение бернштейновских волн возможно за счет линейной трансформации электромагнитных волн в неоднородной плазме [3].

Известно несколько способов реализации такой трансформации в тороидальной плазме. Наибольшее распространение получила так называемая схема O-X-B трансформации. Согласно этой схеме излучение вводится в плазму со стороны слабого магнитного поля в виде обыкновенной (O) волны. Вблизи поверхности отсечки излучение частично трансформируется в необыкновенную (X) волну, которая распространяется в плазме вплоть до области верхнего гибридного резонанса. В этой области происходит вторичная трансформация X волны в электронную бернштейновскую (B) волну. После конверсии в B волну излучение свободно распространяется в сторону увеличения напряженности магнитного поля, в том числе и в области закритической плазмы, доходя до области ЭЦ резонанса, где происходит поглощение излучения и нагрев плазмы.

Данная схема нагрева плазмы была реализована экспериментально на таких установках, как Wendelstein 7-AS [4], MAST [2], TCV, WEGA, LHD и других. При этом измеренная экспериментально эффективность О-Х-В нагрева во всех случаях оказалась значительно ниже предсказанной, и это дало импульс к более детальным теоретическим исследованиям.

Эффективность О-Х-В конверсии в значительной степени определяется эффективностью его первой стадии (О-Х трансформацией), поскольку после неё волна оказывается эффективно заперта в плотной плазме (в некоторых случаях небольшая доля мощности может выходить в виде низкочастотного излучения за счет параметрического распада вблизи верхнего гибридного резонанса [5]). В самой области О-Х трансформации влияние нелинейных эффектов пренебрежимо мало: для типичных параметров излучения можно показать, что энергия осцилляций электрона в поле электромагнитной волны составит порядка 0,1 эВ, что значительно меньше характерных температур в термоядерной плазме. Более подробно влияние нелинейных эффектов описано в [6], однако главным образом О-Х конверсия исследовалась как линейный процесс, зависящий от распределения усредненных характеристик плазмы и магнитного поля, а также флуктуаций плотности плазмы.

Традиционно О-Х трансформация рассматривалась в рамках плоскостоего приближения, в рамках которого считалось, что концентрация плазмы и магнитное поле детерминированы и меняются только вдоль одного направления [7]. Затем было замечено, что в тороидальных ловушках градиенты плотности плазмы и модуля магнитного поля в общем случае не параллельны, и поэтому нужно учитывать двумерную неоднородность среды. Было обнаружено, что в двумерно неоднородной среде при линейном взаимодействии волн появляются качественно новые эффекты [8, 9], наиболее важным из которых с точки зрения практики является существование полностью трансформирующегося пучка с конечной апертурой. Соответственно, последующие теоретические работы предлагали еще более аккуратное описание плазмы и магнитного поля, в частности учитывалась произвольная неоднородность модуля и направления магнитного поля [10, 11]. Однако в то же время практически во всех работах игнорировалась кривизна магнитных поверхностей, хотя её существенное влияние на эффективность О-Х трансформации было продемонстрировано в полноволновом моделировании [12].

Что касается флуктуаций, то первоначально их влияние было описано в работе [4] для объяснения наблюдавшейся в эксперименте низкой эффективности О-Х-В нагрева, однако в недавней работе [13] в рамках более последовательного подхода роль флуктуаций была полностью пересмотрена. Было показано, что рассмотренный в [4] механизм влияния флуктуаций плотности плазмы на линейное взаимодействие волн не может существенно менять эффективность трансформации в современных установках, но в то же время были обозначены и новые механизмы, роль которых еще предстоит выяснить.

В конечном итоге, несмотря на большое количество работ по теме, полная количественная теория, объясняющая полученные в ходе экспериментальных кампаний данные, отсутствует.

Отдельный интерес представляет также применение ЭЦ нагрева в открытых магнитных ловушках, которое до недавнего времени было ограничено либо относительно компактными лабораторными установками, такими как OGRA-4, SMIS 37, A-PHOENIX, либо задачами МГД-стабилизации и генерации быстрых электронов в плазме достаточно низкой плотности, прежде всего, на установке ГАММА-10. Единственное исключение – это проведенная в конце 1980-х серия экспериментов на установке ТМХ-У в Ливерморе, в которой ЭЦ нагрев позволил достичь наибольшей на тот момент температуры электронов 280 эВ в относительно плотной плазме.

Вместе с тем, именно для плотной плазмы на крупномасштабном плазменном стенде ГДЛ (газодинамическая ловушка) в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера прямой ЭЦР нагрев электронной компоненты обеспечил достижение рекордных параметров удержания. Успешный эксперимент по комбинированному нагреву плазмы нейтральными пучками и СВЧ излучением на установке ГДЛ описан в работе [14]. В результате этих исследований впервые была достаточно убедительно продемонстрирована перспективность использования магнитных ловушек открытого типа с осесимметричной конфигурацией в качестве мощных нейтронных источников для термоядерных приложений.

Реализация эффективного ЭЦ нагрева плотной плазмы в достаточно большой открытой ловушке требует некоторого пересмотра сложившихся представлений как о физике циклотронного взаимодействия, так и о последующем транспорте энергии и стабилизации плазменного шнура, поскольку ни одна из используемых на практике схем нагрева тороидальной плазмы не работает в этом случае [15]. Важную роль при этом играют методы моделирования распространения и поглощения электромагнитных волн в неоднородной плазме ловушки. До недавнего времени такое моделирование проводилось исключительно в рамках приближения геометрической оптики методом трассировки лучей. В частности, именно таким способом была обоснована основная схема ЭЦ нагрева, используемая в ГДЛ [15]. Однако в этой схеме возникают области отражения и поглощения волн, в которых среда перестает быть плавнеоднородной, поэтому детальное понимание физики происходящих процессов требует выхода за рамки геометрооптического приближения.

Основные эффекты, приводящие к нарушению приближения геометрической оптики – это пространственная дисперсия в сильно неоднородной области резонансного поглощения, дифракционное расщепление волнового пучка и формирование каустик в окрестности точек полного внутреннего отражения. Прямой учет этих эффектов в рамках полной системы уравнений Максвелла сложен, в частности, из-за малой длины волны излучения по сравнению с размерами установки. Альтернативой этому подходу является последова-

тельный квазиоптический подход, основанный на асимптотическом разложении уравнений Максвелла в парааксиальном приближении в окрестности выделенной ВКБ моды [16]. Использование квазиоптических методов моделирования позволяет точнее предсказывать распределение поглощенной СВЧ мощности и оптимизировать сценарии ЭЦ нагрева в открытых магнитных ловушках.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью настоящей диссертационной работы является исследование новых возможностей для СВЧ нагрева плотной плазмы в системах с магнитным удержанием с использованием квазиоптических волновых пучков миллиметрового диапазона длин волн. Целью и актуальностью темы обусловлены следующие задачи диссертационной работы:

1. Построение теории линейного взаимодействия волновых пучков с учетом особенностей распределения плазмы и магнитного поля в тороидальных магнитных ловушках.
2. Исследование влияния флуктуаций плотности на распространение и взаимодействие волновых пучков в магнитоактивной плазме.
3. Развитие средств моделирования распространения волновых пучков в плотной плазме открытой магнитной ловушки, позволяющих корректно учитывать влияние сильной рефракции, пространственной дисперсии и резонансного поглощения.

Научная новизна проведенных исследований

- Решена новая модельная задача в теории линейного взаимодействия обыкновенной и необыкновенной волн ЭЦ диапазона частот в неоднородной магнитоактивной плазме в окрестности поверхности критической концентрации, учитывающая глобальную тороидальную геометрию магнитного поля и плазмы. Получена система эталонных уравнений и её решение, учитывающее влияние характерной для токамака неоднородности плазмы – кривизны силовых линий магнитного поля, неоднородности напряженности магнитного поля и постоянства давления плазмы на магнитных поверхностях.
- Был обнаружен новый эффект, сильно влияющий на эффективность линейной трансформации нормальных волн ЭЦ диапазона частот в неоднородной магнитоактивной плазме. Эффективность трансформации существенно снижается, если поверхность фазового фронта медленной огибающей волнового пучка отличается от оптимальной, которая в установках с большим аспектным отношением с высокой точностью совпадает с поверхностью критической концентрации. Этот эффект может объяснить низкую эффективность нагрева закритической плазмы в токамаках и стеллараторах, систематически наблюдающуюся в большинстве экспериментов по линейной конверсии внешнего электромагнитного излучения в квазиэлектростатические

бернштейновские волны. В то же время, это падение эффективности может быть полностью скомпенсировано оптимальной фокусировкой волнового пучка.

- Показано, что поляризационное вырождение нормальных волн в магнитоактивной плазме подавляет известный эффект усиления обратного брэгговского рассеяния электромагнитных волн на флуктуациях плотности плазмы в окрестности области отсечки. В то же время, среднеквадратичное отклонение случайного коэффициента отражения всегда оказывается много больше возмущения его среднего значения, что необходимо учитывать при диагностике температуры плазмы, основанной на регистрации излучения электронных бернштейновских волн.
- Получено новое выражение для эффективности туннелирования волнового пучка со случайной фазовой модуляцией через неоднородную область непрозрачности в окрестности поверхности плазменной отсечки в тороидальной магнитоактивной плазме.
- На основе усовершенствованного квазиоптического подхода разработан универсальный численный код для моделирования распространения электромагнитных волновых пучков СВЧ диапазона в открытых магнитных ловушках. Код позволяет одновременно учитывать эффекты дифракции, резонансной диссипации, сильной пространственной дисперсии и пространственной неоднородности.
- Впервые в рамках квазиоптического подхода было проведено исследование эффективных способов ЭЦ нагрева плазмы в крупномасштабной открытой ловушке. Квазиоптическое моделирование профилей распределения поглощенной СВЧ мощности для установки ГДЛ (ИЯФ СО РАН, Новосибирск) подтвердило результаты, полученные ранее с помощью геометрикооптического моделирования для уже реализованных в эксперименте сценариев ЭЦ нагрева; предложен новый улучшенный сценарий ЭЦ нагрева, в котором реализуется более равномерный нагрев всего объема плазмы.

Методы и подходы, используемые в диссертации

В диссертации использованы современные аналитические и численные методы решения электродинамических задач:

- Процедура укорочения уравнений Максвелла для плавно-неоднородной анизотропной и гиротропной среды применена для построения теории линейной трансформации нормальных волн вблизи критической поверхности в магнитоактивной плазме.
- Борновское приближение использовалось для анализа брэгговского рассеяния на флуктуациях плотности магнитоактивной плазмы в окрестности поверхности отсечки в условиях поляризационного вырождения.

- Численное моделирование брэгговского рассеяния на флуктуациях плотности плазмы в окрестности поверхности отсечки в условиях поляризационного вырождения выполнялось при помощи методики, основанной на формализме операторного уравнения Риккати для коэффициента связи между нормальными волнами (импедансный подход).
- Моделирование ЭЦ нагрева плазмы в прямой ловушке производилось при помощи нового квазиоптического подхода, который позволяет свести задачу однонаправленного распространения волнового пучка в неоднородной и диссипативной среде с сильной пространственной дисперсией к решению эволюционного операторного уравнения.
- Для численного решения полученного квазиоптического уравнения использовался модифицированный метод операторной экспоненты.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Эффективность линейной трансформации нормальных волн электронного циклотронного диапазона частот в тороидально-неоднородной магнитоактивной плазме существенно снижается, когда поверхность фазового фронта медленной огибающей волнового пучка отличается от оптимальной, которая в установках с большим аспектным отношением с высокой точностью совпадает с поверхностью критической концентрации.
2. Поляризационное вырождение нормальных волн в магнитоактивной плазме подавляет известный эффект усиления обратного брэгговского рассеяния в окрестности области отсечки для электромагнитных волн рассеивающихся на флуктуациях плотности плазмы.
3. Разработанный на основе усовершенствованного квазиоптического подхода универсальный численный код позволяет моделировать распространение электромагнитных волновых пучков СВЧ диапазона в современных открытых магнитных ловушках, одновременно учитывая эффекты дифракции, резонансной диссипации, сильной пространственной дисперсии и пространственной неоднородности.

Научная и практическая ценность

Научная и практическая значимость проведенных исследований определяются широким спектром применений микроволнового излучения в научном эксперименте и технологиях. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы для повышения эффективности использования мощных генераторов микроволнового излучения в термоядерных исследованиях.

Построенная в работе теория линейной трансформации волновых позволяет повысить эффективность СВЧ нагрева магнитоактивной плазмы с плотностью выше критической для распространения электромагнитных волн.

Успешная реализация О-Х-В схемы даст возможность использовать микроволновой нагрев в перспективных термоядерных установках, где реализуется высокая плотность плазмы (Т-15, Wendelstein 7-Х, Глобус-М2, MAST, NSTX).

Квазиоптическое моделирование электронного циклотронного нагрева плазмы в прямой магнитной ловушке уже используется при планировании эксперимента в осесимметричной газодинамической ловушке ГДЛ (ИЯФ СО РАН, Новосибирск). Этот подход также может быть применен и для ловушек без осевой симметрии (ГАММА-10, University of Tsukuba) и конфигураций с обращенным магнитным полем (СЗВ, TriAlpha Energy).

Публикации, апробация работы

Результаты диссертационной работы изложены в научных статьях в ведущих отечественных и зарубежных журналах: Физика плазмы, Журнал экспериментальной и теоретической физики, Вопросы атомной науки и техники, Plasma Physics and Controlled Fusion, Physics of Plasmas. Всего по теме диссертации опубликовано 6 статей в реферируемых журналах, 1 электронный препринт, 6 статей в сборниках трудов международных конференций и 4 тезиса докладов. Материалы диссертации докладывались на международных конференциях, в том числе European Physical Society Conference on Plasma Physics, European Fusion Theory Conference, International Workshop “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications”, Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion Alushta.

Личный вклад автора

Основные результаты, представленные в диссертации и вошедшие в работы [1А-12А], получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводилась совместно с научным руководителем. Вклад соискателя состоял в аналитическом и численном исследовании уравнений для электрического поля электромагнитных волн. Теоретические исследования проводились автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя. Все численные расчеты выполнены автором диссертации лично.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка основных публикаций автора по теме работы и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 118 страниц, включая 21 рисунок, 1 таблицу и список литературы из 106 наименований. Список основных публикаций автора по теме диссертации содержит 12 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи диссертационной работы, отмечена научная новизна проведенных исследований, описаны использованные методы и подходы, приведены основные положения, выносимые на защиту, научная и практическая ценность, а также кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе диссертации развивается теория линейного взаимодействия обыкновенной (О) и необыкновенной (Х) волн электронно-циклотронного диапазона в тороидальных магнитных ловушках [1А-6А]. В рамках двух независимых подходов исследуется влияние особенностей геометрии равновесной конфигурации плазмы на эффективность О-Х трансформации. Первый подход предлагает учет глобальной тороидальной структуры области взаимодействия волн в модельной среде, второй напротив стремится к максимально правдоподобию описанию плазмы и магнитного поля в магнитных ловушках, пусть и в ограниченной области.

В разделе 1.1 вводится модельная среда, учитывающая глобальную тороидальную геометрию магнитного поля и плазмы. Модель соответствует классическому токамаку с большим аспектным отношением без полоидального магнитного поля и шафрановского сдвига: вектор магнитного поля имеет только тороидальную компоненту, а поверхности постоянного давления образуют концентрические круговые торы. Соответственно поверхности отсечки (поверхности ограничивающие области распространения О и Х волн) также будут торами как это показано на рис. 1. Для этой среды получена эталонная система укороченных уравнений, описывающая распределение электрического поля, отвечающее фиксированному значению тороидального волнового числа, в окрестности области трансформации. Для полученной системы найдено полное аналитическое решение в виде разложения по дискретному набору ортогональных базисных функций.

Раздел 1.2 содержит качественный анализ полученного решения. Обсуждаются эффекты двумерной неоднородности: пространственно локализованный пучок, испытывающий полную трансформацию и асимметрия трансформации при вводе пучка сверху и снизу от экваториальной плоскости. Показано как тороидальная кривизна усиливает эффект асимметрии. Изучены пределы применимости одномерного приближения.

В разделе 1.3 отдельно рассматривается роль кривизны магнитных поверхностей при определении начальных условий для полученного решения. Обнаружено, что геометрия магнитного поля и плазмы задают оптимальную поверхность, близкую к поверхности критической концентрации плазмы для установок с большим аспектным отношением, отклонение фазового фронта медленной огибающей волнового пучка от которой приводит к сильному снижению эффективности трансформации. Этот эффект может объяснить низкую эффективность нагрева за критической плазмы в токамаках и стеллараторах, систематически наблюдающуюся в большинстве экспериментов по

линейной конверсии внешнего электромагнитного излучения в квазиэлектростатические бернштейновские волны.

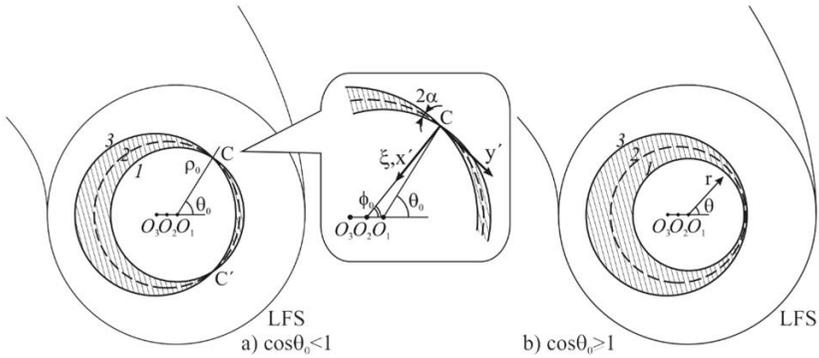


Рис. 1: Полоидальное сечение области О-Х трансформации в токамаке: (а) эффективная трансформация около точек пересечения поверхностей отсечки, (б) неэффективная трансформация в случае непересекающихся поверхностей отсечки. Область нераспространения для левополяризованных волн заштрихована.

В разделе 1.4 построенная теоретическая модель используется для расчета эффективности трансформации квазиоптических пучков, доступных в эксперименте на токамаке FTU. Пересчет волнового поля от выходного зеркала до окрестности перед областью трансформации выполнялся квазиоптическим кодом GRAY с учетом реальной конфигурации магнитного поля и плазмы, при этом сшивка решений производилась в двух разных точках на траектории квазиоптического луча для контроля точности. Расчет показал, что для всех возможных положений фокусирующего зеркала уровень трансформации находится на уровне экспериментальной погрешности его определения из-за того, что поверхность фазового фронта медленной огибающей волнового пучка была выгнута в обратную сторону относительно магнитной поверхности критической концентрации.

В разделе 1.5 задача линейного взаимодействия О-Х волн рассматривается в рамках альтернативного подхода, позволяющего описывать плазму в магнитной конфигурации общего вида с произвольными кривизной магнитной поверхности и неоднородностью модуля и направления магнитного поля. Плотность плазмы и магнитное поле задаются при помощи локальных разложений с девятью независимыми скалярными параметрами. Для этой среды получена система укороченных уравнений, описывающая распределение

электрического поля, а затем показано как при помощи фазовых замен и перехода в криволинейную систему координат, её можно свести к упрощенной базовой системе уравнений только с тремя управляющих параметрами:

$$\begin{cases} -\left[i \frac{\partial}{\partial x''} - \frac{\partial}{\partial y''} + icx'' \right] \bar{A}_{\parallel} = [x'' \cos \alpha + y'' \sin \alpha + d] \bar{A}_{+} \\ -\left[i \frac{\partial}{\partial x''} + \frac{\partial}{\partial y''} - icx'' \right] \bar{A}_{+} = [x'' \cos \alpha - y'' \sin \alpha - d] \bar{A}_{\parallel} \end{cases}.$$

Здесь $2d$ – расстояние между поверхностями отсечки, 2α – угол их взаимного наклона, а коэффициент c определяется неоднородностью магнитного поля, вызываемой током, текущим вдоль магнитной линии. Формально базовая система соответствует задаче О-Х трансформации в конфигурации с плоскими пересекающимися поверхностями отсечки и широм магнитного поля, которая в подробно рассматривалась в [10]. Для базовой системы построено новое приближенное решение, сводящееся к ранее известным точным решениям в физически важных предельных случаях $\alpha = 0$ и $c = 0$. Полученное решение дает возможность предсказывать эффективность О-Х трансформации с учетом всех существенных особенностей равновесной магнитной конфигурации и формировать требования к форме оптимальных пучков.

Во второй главе анализируется влияние флуктуаций плотности плазмы на эффективность О-Х трансформации [7А-9А]. Рассматривается как эффективность может меняться из-за рассеяния О-волны до области трансформации или из-за непосредственного возмущения коэффициента связи между взаимодействующими волнами. Отдельно исследуется влияние малоуглового рассеяния, накапливающееся на большей части трассы пучка в плазме, и влияние обратного брэгговского рассеяния, которое возникает вблизи поверхностей отсечки.

В разделе 2.1 кратко рассматривается известный механизм усиления брэгговского рассеяния электромагнитных волн в окрестности поверхности отсечки в отсутствии поляризационного вырождения.

В разделе 2.2 исследуется обратное брэгговское рассеяние на флуктуациях плотности в окрестности поверхности отсечки в условиях поляризационного вырождения. Формулируется модельная задача на распределение волнового поля в области линейного взаимодействия волн в окрестности поверхности критической концентрации в среде с одномерным распределением концентрации и постоянным магнитным полем. В рамках этой задачи показывается, что флуктуации не только сами не приводят к рассеянию назад, но и не модифицируют коэффициент отражения в первом порядке борновского приближения. Для флуктуаций с малой амплитудой возмущение среднего коэффициента отражения вычислено во втором порядке борновского приближения. Показано, что флуктуации в среднем уменьшают коэффициент отражения и улучшают прохождение волн через область непрозрачности за счет перерассеяния отраженной волны. Таким образом, в присутствии поляризации

онного вырождения характерного для общего случая усиления обратного брэгговского рассеяния в области отсечки не происходит.

В разделе 2.3 рассматривается дисперсия случайного коэффициента отражения волны, рассеивающейся на флуктуациях плотности в окрестности поверхности отсечки в условиях поляризационного вырождения. Показано, что эта дисперсия имеет тот же порядок, что и возмущение среднего значения случайного коэффициента отражения, а среднеквадратичное отклонение, соответственно, всегда оказывается много больше этого возмущения. Отмечается, что это обстоятельство может оказаться важным в задачах, связанных с микроволновой диагностикой плотной плазмы.

В разделе 2.4 аналитические результаты, полученные в разделах 2.2–2.3, проверяются при помощи численного моделирования. Численное решение строится для укороченных уравнений Максвелла эквивалентных использованным в разделе 2.2 при помощи методики, основанной на формализме операторного уравнения Риккати для коэффициента связи между нормальными волнами (импедансный подход). Моделирование проводилось для различных значений корреляционного масштаба флуктуаций, их амплитуды и поперечных относительно магнитного поля углов ввода излучения. Продольный угол ввода излучения считался постоянным и оптимальным также, как и в разделе 2.2. Сравнивались посчитанные аналитически и численно возмущение среднего коэффициента отражения и его среднеквадратичное отклонение. В области малых значений амплитуды флуктуаций, для которой были получены аналитические выражения, получено хорошее совпадение результатов во всем диапазоне остальных параметров. Для больших значений амплитуды показано, что влияние флуктуаций оказывается еще меньше теоретических оценок.

В разделе 2.5 анализируется изменение эффективности трансформации, в случае если флуктуации плотности плазмы непосредственно возмущают коэффициент связи между взаимодействующими волнами в неоднородном магнитном поле. Делается вывод, что из-за характерных особенностей тороидальных магнитных ловушек этот механизм возмущает коэффициент трансформации довольно незначительно, хотя и гораздо сильнее, чем рассмотренное ранее брэгговское рассеяние. Для возмущения среднего коэффициента трансформации приводится аналитическая оценка, учитывающая специфику магнитной конфигурации общего вида, определенной в разделе 1.5.

В разделе 2.6 рассматривается влияние малоуглового рассеяния волнового пучка на флуктуациях плотности плазмы на эффективность О-Х трансформации. В рамках этой задачи аналитические выражения для эффективности трансформации волнового пучка, полученные в разделе 1.5, обобщаются на случай пучка со случайной фазовой модуляцией.

Третья глава посвящена моделированию резонансного СВЧ нагрева плазмы в крупномасштабной прямой ловушке в рамках последовательного квазиоптического приближения для уравнений Максвелла [10А-12А]. Такой

подход позволяет моделировать распространение электромагнитных волновых пучков СВЧ диапазона, одновременно учитывая эффекты дифракции, резонансной диссипации, сильной пространственной дисперсии и пространственной неоднородности.

В разделе 3.1 приводятся основные шаги вывода квазиоптического уравнения. Показано как в уравнениях Максвелла выделяется волновая мода с заданным направлением распространения, а затем выводится операторное эволюционное уравнение, задающее изменение скалярной амплитуды её медленной огибающей

$$\frac{\partial u}{\partial z} = ik_0 \hat{H}[u],$$

где \hat{H} определяет оператор изменения продольного волнового числа относительно несущей гармоники, выраженному через поперечные производные

$$k_0 \hat{H} = \hat{k}_z(\mathbf{r}, -i\nabla_{\perp}) - \kappa(z).$$

Ось z здесь сонаправлена с направлением распространения волновой моды и совпадает с осью симметрии ловушки. Также в разделе вводится отдельное выражение для плотности поглощенной СВЧ мощности, определяемое через антиэрмитову часть оператора \hat{H} и рассматриваются условия применимости квазиоптического подхода.

Разделы 3.2 и 3.3 посвящены выбору адекватного представления квазиоптического оператора \hat{H} , т. е. способу определения оператора по решению алгебраического дисперсионного уравнения $k_z(\mathbf{r}, \mathbf{k}_{\perp})$ для рассматриваемой моды. В разделе 3.2 рассматривается упрощенное представление, использовавшееся ранее для моделирования электронного циклотонного нагрева [16] и генерации тока в тороидальных магнитных ловушках. Показано, что сложившееся упрощенное представление неприменимо для прямых ловушек, поскольку позволяет корректно учитывать неоднородность плазмы и пространственную дисперсию, связанную с тепловым движением частиц и резонансным взаимодействием только в средах, отвечающих специфическим условиям, которые в прямых ловушках не выполняются.

В разделе 3.3 формулируется новое представление квазиоптического оператора, позволяющее учитывать эффекты дифракции, резонансной диссипации, сильной пространственной дисперсии и пространственной неоднородности для среды общего вида. Для квазиоптического уравнения на скалярную амплитуду волнового пучка, использующего новое представление, приводится метод численного решения, основанный на методе операторной экспоненты.

В разделе 3.4 описываются процедура вычисления ядра квазиоптического оператора через решение дисперсионного соотношения и другие особенности численной схемы, непосредственно реализованные в численном коде для моделирования СВЧ нагрева плазмы в прямой ловушке.

В разделе 3.5 рассматриваются первые результаты численного моделирования ЭЦ нагрева плазмы на установке ГДЛ. Для уже реализованных в эксперименте сценариев моделирование профилей распределения СВЧ мощности подтвердило результаты, полученные ранее с помощью геометрикооптического моделирования. Также предложен новый улучшенный сценарий в котором реализуется более равномерный нагрев всего объема плазмы в магнитной ловушке.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты работы

1. Развита теория линейного взаимодействия обыкновенной и необыкновенной волн ЭЦ диапазона частот в неоднородной магнитоактивной плазме в окрестности поверхности критической концентрации, основанная на решении новой модельной задачи, в которой, в отличие от ранее использовавшихся подходов, учитывается глобальная тороидальная геометрия магнитного поля и плазмы. Получена система эталонных уравнений и её решение, учитывающие влияние характерной для токамака неоднородности – кривизны силовых линий магнитного поля, неоднородности напряженности магнитного поля и постоянства давления плазмы на магнитных поверхностях.
2. Обнаружен новый эффект, связанный с кривизной магнитных поверхностей, который существенно влияет на эффективность линейной трансформации нормальных волн ЭЦ диапазона частот в тороидально-неоднородной магнитоактивной плазме. Показано, что эффективность трансформации снижается, когда поверхность фазового фронта медленной огибающей волнового пучка отличается от оптимальной, которая в установках с большим аспектным отношением с высокой точностью совпадает с поверхностью критической концентрации. Этот эффект может объяснить низкую эффективность нагрева закритической плазмы в токамаках и стеллараторах, систематически наблюдающуюся в большинстве экспериментов по линейной конверсии внешнего электромагнитного излучения в квазиэлектростатические бернштейновские волны. В то же время негативное влияние кривизны может быть полностью скомпенсировано оптимальной фокусировкой волнового пучка.
3. Исследованы особенности брэгговского рассеяния назад в условиях поляризационного вырождения нормальных волн в магнитоактивной плазме. Показано, что случай поляризационного вырождения в гиротропной плазме вблизи поверхности отсечки сильно отличается от общего случая, когда различные нормальные волны связаны слабо. Продемонстрировано, что после усреднения по случайным реализациям профилей плотности плазмы при условиях, отвечающих эффективной линейной трансформации, характерного для общего случая усиления обратного брэгговского

рассеяния в области отсечки не происходит. В то же время среднеквадратичное отклонение случайного коэффициента отражения всегда оказывается много больше возмущения его среднего значения, что необходимо учитывать при диагностике температуры плазмы, основанной на регистрации излучения электронных бернштейновских волн.

4. На основе усовершенствованного квазиоптического подхода разработан численный код для моделирования распространения электромагнитных волновых пучков СВЧ диапазона в открытых магнитных ловушках. Код позволяет одновременно учитывать эффекты дифракции, резонансной диссипации, сильной пространственной дисперсии и пространственной неоднородности.
5. Новый квазиоптический подход был использован для исследования эффективных способов ЭЦ нагрева плазмы в перспективных открытых магнитных ловушках. В частности, квазиоптическое моделирование профилей распределения поглощенной СВЧ мощности в крупномасштабной газодинамической ловушке ГДЛ (ИЯФ СО РАН, Новосибирск) подтвердило результаты, полученные ранее с помощью геометрооптического моделирования для уже реализованных в эксперименте сценариев ЭЦ нагрева. Для установки ГДЛ предложен новый улучшенный сценарий ЭЦ нагрева плазмы, в котором реализуется равномерный нагрев всего объема плазмы в магнитной ловушке.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [1A] *Хусаинов Т. А., Господчиков Е. Д., Шалашов А. Г.* Влияние кривизны магнитных поверхностей на линейную трансформацию волн электронного циклотронного диапазона в плазме токамака // *Физика плазмы*. 2012. Т. 38, № 2. С. 99.
- [2A] *Gospodchikov E. D., Khusainov T. A., Shalashov A. G.* Impact of poloidal curvature on linear mode conversion of quasi-optical wave beams in tokamak plasmas // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2012. V. 54(4). P. 045009.
- [3A] *Gospodchikov E. D., Khusainov T. A., Shalashov A. G.* Electron temperature effects in linear coupling of electron-cyclotron waves near the cut-off layers in fusion plasmas // *Problems of atomic science and technology*. 2012. V. 82(6) P. 64-66
- [4A] *Gospodchikov E.D., Khusainov T.A., Shalashov A.G.* Curvature effects on linear mode-conversion of electron cyclotron waves in tokamak plasmas // *Proceedings of 8th International Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications"*. (09-16.06.2011, Nizhny Novgorod). N. Novgorod: Institute of Applied Physics RAS. 2011. P. 179-180.

- [5A] *Gospodchikov E.D., Khusainov T.A., Shalashov A.G.* On the linear O-X mode-coupling in warm magnetized plasmas in toroidal magnetic traps // EPS Series. 2012. V. 36F. P. P5.067
- [6A] *Gospodchikov E.D., Khusainov T.A., Shalashov A.G.* Electron temperature effects in linear coupling of electron-cyclotron waves near the cut-off layers in fusion plasmas // Proceedings of “International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion Alushta-2012”. (17-21.09.2012, Alushta) Kharkov Institute of Physics and Technology 2012 P. 49.
- [7A] *Господчиков Е. Д., Хусаинов Т. А., Шалашиов А. Г.* Ослабление обратного брэгговского рассеяния электромагнитных волн на флуктуациях плотности в окрестности области поляризационного вырождения в магнитоактивной плазме // Физика плазмы. 2016. Т. 42, №. 8. С. 695–706.
- [8A] *Shalashov A.G., Gospodchikov E.D., Khusainov T.A.*, Theory of the O-X mode coupling in fluctuating plasmas // Proc. of 9th International Workshop “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications”. (24-30.06.2014, Nizhny Novgorod). N. Novgorod: Institute of Applied Physics RAS. 2014. P. 111-112.
- [9A] *Gospodchikov E.D., Shalashov A.G., Khusainov T.A.* Theory of the ordinary and extraordinary mode coupling in fluctuating plasmas // EPS Series 2015. V. 39E. P. 5.408
- [10A] *Shalashov A. G., Balakin A. A., Gospodchikov E. D., Khusainov T. A.* Quasi-optical theory of microwave plasma heating in open magnetic trap // Physics of Plasmas. 2016. V. 23(11). P. 112504.
- [11A] *Шалашиов А. Г., Балакин А. А., Хусаинов Т.А.,* Господчиков Е.Д., Соломахи А. Л. Квазиоптическое моделирование ЭЦ нагрева плазмы в прямой магнитной ловушке // ЖЭТФ. 2017. Т. 151. №. 2. С. 379–395.
- [12A] *Bagryansky P.A., Anikeev A.V., Balakin A.A., Denisov G.G., Gospodchikov E.D., Ivanov A.A., Lizunov A.A., Khusainov T.A., Kovalenko Yu.V., Malygin V.I., Maximov V.V., Korobeinikova O.A., Murakhtin S.V., Pinzhenin E.I., Prikhodko V.V., Savkin V.Ya., Shalashov A.G., Smolyakova O.B., Soldatkina E.I., Solovakhin A.L., Yakovlev D.V., Zaytsev K.V.* ECR plasma heating experiment in the GDT magnetic mirror // EPS Series 2015. V. 39E. P. O5.140.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Thumm M.* Recent advances in the worldwide fusion gyrotron development // IEEE Transactions on Plasma Science. 2014. V. 42 (3). P. 590-599.
- [2] *Preinhaelter, J., Irzak, M.A., Vahala, L., Vahala, G.* Electron cyclotron resonance heating in spherical plasmas: O-X-EBW mode conversion in MAST // Review of Scientific Instruments. 2001. V. 72 (1). P. 391-393.
- [3] *Laqua H. P.* Electron Bernstein wave heating and diagnostic // PPCF. 2007. V. 49 (4). P. R1–R42.
- [4] *Laqua H. P. et al.* Resonant and nonresonant electron cyclotron heating at densities above the plasma cutoff by OXB mode conversion at the W7-AS stellarator // PRL. 1997. V. 78 (18). P. 3467.
- [5] *Gusakov E. Z., Surkov A. V.* Induced backscattering in an inhomogeneous plasma at the upper hybrid resonance // PPCF. 2007. V. 49 (5). P. 631.
- [6] *Litvak A. G. et al.* On nonlinear effects in electron-cyclotron resonance plasma heating by microwave radiation // Physics of Fluids B: Plasma Physics. 1993. T. 5, №. 12. С. 4347-4359.
- [7] *Mjølhus E.* Coupling to Z mode near critical angle // Journal of plasma physics. 1984. V. 31 (1). P. 7-28.
- [8] *Gospodchikov E. D., Shalashov A. G., Suvorov E. V.* On the influence of 2D inhomogeneity on electromagnetic mode conversion near the cut-off surfaces in magnetized plasmas // PPCF. 2006. V. 48 (6). P. 869.
- [9] *Попов А. Ю., Пилюя А. Д.* О трансформации нормальных волн в области критической плотности плазмы в холодной анизотропной плазме с двумерной неоднородностью в диапазоне электронных циклотронных частот // Физика плазмы. 2007. Т. 33, №. 2. С. 128-136.
- [10] *Shalashov A. G., Gospodchikov E. D.* On O–X mode conversion near the cut-off surfaces in 3D sheared magnetic field // PPCF. 2010. V. 52 (11). P. 115001.
- [11] *Popov A. Yu.* On O–X mode conversion in 2D inhomogeneous plasma with a sheared magnetic field // PPCF. 2010. V. 52 (3). P. 035008.
- [12] *Köhn A. et al.* Full-wave calculation of the O–X–B mode conversion of Gaussian beams in a cylindrical plasma // PPCF. 2008. V. 50 (8). P. 085018.
- [13] *Shalashov A. G., Gospodchikov E. D.* Theory of the ordinary and extraordinary mode coupling in fluctuating plasmas // PPCF. 2014. V. 56 (12). P. 125011.
- [14] *Bagryansky P. A., Anikeev A. V., Denisov G. G., Gospodchikov E. D. et al.* Overview of ECR plasma heating experiment in the GDT magnetic mirror // Nuclear Fusion. 2015. V. 55 (5). P. 053009.
- [15] *Shalashov A. G., Gospodchikov E. D., Smolyakova O. B., Bagryansky P. A. et al.* Auxiliary ECR heating system for the gas dynamic trap // Physics of Plasmas. 2012. V. 19 (5). P. 052503.
- [16] *Balakin A. A., Balakina M. A., Westerhof E.* ECRH power deposition from a quasi-optical point of view // Nuclear Fusion. 2008. V. 48 (6). P. 065003.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение.....	4
Глава 1. Линейная трансформация волновых пучков в плазме тороидальных магнитных ловушек.....	16
1.1 Эталонные волновые уравнения в тороидальной геометрии и их решение	18
1.2 Качественный анализ решения и соответствие с ранее разработанными теориями.....	28
1.3 Эффект кривизны фазового фронта.....	33
1.4 Расчет эффективности О-Х трансформации для эксперимента на токамаке FTU.....	38
1.5 Решение задачи О-Х трансформации с одновременным учетом кривизны магнитных поверхностей и неоднородности магнитного поля	43
1.6 Заключение к главе 1.....	57
Глава 2. Влияние флуктуаций на распространение и взаимодействие волновых пучков в магнитоактивной плазме.....	59
2.1 Брэгговское рассеяние электромагнитных волн в окрестности поверхности отсечки в отсутствии поляризационного вырождения.....	60
2.2 Ослабление обратного брэгговского рассеяния на флуктуациях плотности в окрестности поверхности отсечки в условиях поляризационного вырождения.....	62
2.3 Флуктуации коэффициента отражения.....	69
2.4 Примеры численного моделирования.....	70
2.5 О влиянии флуктуаций плотности плазмы на эффективность О-Х трансформации в тороидальных магнитных ловушках	76
2.6 Эффективность О-Х трансформации волнового пучка со случайной фазовой модуляцией в тороидально-неоднородной плазме	78
2.7 Заключение к главе 2.....	81
Глава 3. Квазиоптическое моделирование электронного циклотронного нагрева плазмы в прямой магнитной ловушке	83
3.1 Основные шаги вывода квазиоптического уравнения	85
3.2 «Традиционное» представление квазиоптического оператора и пределы его применимости	90
3.3 Новое представление операторов в квазиоптическом уравнении.....	93
3.4 Квазиоптический оператор, соответствующий открытой магнитной ловушке	98
3.5 Моделирование ЭЦ нагрева плазмы на установке ГДЛ. Оптимизация параметров эксперимента.	100
3.6 Заключение к главе 3.....	105
Заключение	106
Основные публикации автора по теме диссертационной работы	108
Список литературы.....	110

ХУСАИНОВ Тимур Айратович

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛНОВЫХ ПУЧКОВ
В НЕОДНОРОДНОЙ МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 12.04.2017 г.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,25.
Тираж 100 экз. Заказ № 23(2017).

Отпечатано на ризографе в типографии Института прикладной физики РАН,
603950 г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46