

На правах рукописи

ПОПОВ Алексей Юрьевич

**ТЕОРИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ
МИКРОВОЛНОВЫХ ПУЧКОВ В НЕОДНОРОДНОЙ
ТУРБУЛЕНТНОЙ ПЛАЗМЕ**

01.04.08 Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург
2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико - технического институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный консультант:

Гусаков Евгений Зиновьевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико - технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, заведующий лабораторией физики высокотемпературной плазмы

Официальные оппоненты:

Ерохин Николай Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), заведующий отделом космогеофизики

Тимофеев Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, НИЦ «Курчатовский институт», Курчатовский комплекс физико-химических технологий, главный научный сотрудник

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

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

Защита состоится 7 апреля 2016 г. в 14⁰⁰
(дата, время)

на заседании диссертационного совета Д-002.205.03 по адресу: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФТИ им. А.Ф. Иоффе <http://www.ioffe.ru>

Автореферат разослан 4 марта 2016 г.
(дата)

Ученый секретарь
диссертационного совета Красильщиков Александр Михайлович, к.ф.-м.н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень ее разработанности

К настоящему времени электродинамика неоднородной плазмы достигла существенного прогресса, который обусловлен последовательным применением асимптотических методов к решению дифференциальных уравнений второго и более высокого порядка, а также к интегро-дифференциальным уравнениям. Это привело к возможности описать в рамках модельных задач линейную трансформацию волн, – зацепление собственных решений, относящихся к различным ветвям колебаний неоднородной замагниченной плазмы на одной частоте, – а также нелинейную трансформацию волн, – взаимодействие нескольких собственных решений, для частот и волновых чисел которых хотя бы локально выполнены резонансные распадные условия. В развитых до настоящего времени теоретических моделях, описывающих процесс распространения, линейной и нелинейной трансформации микроволновых пучков в плазме тороидальных установок, использовались упрощающие предположения, позволявшие свести анализируемую задачу к одномерной, допускающей аналитическое решение. Однако такое упрощение возможно не во всех случаях, и далеко не всегда одномерная модель адекватно описывает экспериментальную ситуацию. Так в последнее время были получены экспериментальные данные, которые невозможно объяснить без учета двумерной/трехмерной неоднородности плазмы токамака/стелларатора, реального профиля невозмущенных параметров, эффектов дифракции и рефракции пучка и наличия в плазме низкочастотной турбулентности. Поэтому диссертация посвящена развитию адекватных реальному эксперименту теоретических моделей, которые описывают линейную и нелинейную трансформацию волновых пучков.

Нелинейная трансформация лежит в основе коллективного рассеяния пучков зондирующих СВЧ волн, которое широко используется как метод диагностики плазмы для получения информации о турбулентности. Для улучшения локализации измерений характеристик турбулентности был предложен новый подход, в рамках которого зондирование осуществляется СВЧ волнами, имеющими в плазме область с сильной рефракцией. Этот

подход, – флуктуационная рефлектометрия [1], – является развитием классической рефлектометрической диагностики, используемой для реконструкции профиля плазмы. Для интерпретации данных измерений и оценки экспериментальных параметров, полученных с помощью различных разновидностей флуктуационной рефлектометрии, до последнего времени использовались упрощенные модели, основанные на предположении о линейном характере рассеяния зондирующей волны и отождествлении поведения рефлектометрического сигнала с флуктуациями плотности плазмы в окрестности поверхности отсечки [2,3]. Однако, предсказания, сделанные в рамках этих упрощенных моделей, находятся в прямом противоречии с экспериментальными данными, что оставляет открытыми вопросы о локальности измерений и о возможности разрешения измерений по спектрам радиальных волновых векторов флуктуаций плотности. Это противоречие делает актуальным развитие последовательных линейной и нелинейной (по амплитуде турбулентности) моделей флуктуационной рефлектометрии и разработку математических процедур восстановления спектров и радиальных профилей флуктуаций плотности.

Линейная трансформация пучков СВЧ волн играет ключевую роль в методе нагрева плазмы, основанного на использовании электронных бернштейновских волн (ЭБВ). Этот метод [4–7] применяется при плотностях плазмы выше критической, когда использование традиционной схемы нагрева при вводе пучка СВЧ волн со стороны слабого магнитного поля сталкивается с проблемой доставки излучения в центральную часть плазменного шнура в область электронного циклотронного (ЭЦ) резонанса. Задача корректного теоретического описания этого метода нагрева в рамках реалистичной модели плазмы распадается на две.

Первая из них – развитие теории линейной трансформации быстрых волн в окрестности критической поверхности с учетом реальной неоднородности плазмы. Эта задача до последнего времени была проанализирована в рамках приближения одномерно-неоднородной плазмы [8–12]. Вопрос о возможности учета влияния двумерной неоднородности плазмы и о способе аналитического описания линейной связи быстрых волн в реалистичной модели плазмы долгие годы оставался открытым. В последнее время возникло

твердое убеждение в необходимости анализа этой проблемы с учетом как двумерной (для стелларатора – трехмерной) неоднородности плазмы [13], так и наличия шира внешнего магнитного поля [14].

Вторая задача – развитие теории распространения и поглощения ЭБВ в двумерно-неоднородной плазме с учетом пространственной дисперсии и слабых релятивистских эффектов. Поскольку ЭБВ является сильно замедленной плазменной волной с весьма небольшой по сравнению с вакуумной поперечной длиной волны, для ее описания обычно вполне достаточно ограничиться потенциальным приближением. К сожалению, точное потенциальное релятивистское дисперсионное уравнение в ЭЦ диапазоне частот является громоздким и не может быть эффективно использовано при теоретическом анализе [15]. Поэтому представляет интерес вывод приближенного дисперсионного уравнения ЭБВ, учитывающего эффекты слабого релятивизма. Кроме того, при распространении ЭБВ в токамаке с малым аспектным отношением имеют место явления, которые не возникают в традиционных установках с большим аспектным отношением. Среди них – возбуждение плазменного волновода для волн, распространяющихся в экваториальной плоскости, появление новых областей прозрачности и заметное отражение падающей волны от поверхности ЭЦ резонанса. Ранее эти явления не были исследованы в литературе. По этой причине задача, включающая их анализ и описание, представляет не только практический, но и самостоятельный теоретический интерес.

Электронный циклотронный нагрев плазмы – это эффективный метод локального дополнительного нагрева, который широко применяется в настоящее время в экспериментах на тороидальных магнитных ловушках и планируется для использования в токамаке – реакторе ITER [16]. Согласно общепринятым представлениям распространение ЭЦ волн и их поглощение в плазме хорошо описываются в рамках линейной теории и являются детально предсказуемыми. Теоретический анализ таких нелинейных явлений как параметрические распадные неустойчивости, выполненный в предположении монотонных профилей плотности плазмы, предсказывает крайне высокий порог их возникновения, который существенно, на несколько порядков, превышает мощность современных гиротронов [17]. Вместе с тем, в

последнее время накопилось значительное число наблюдаемых явлений, не укладывающихся в простую линейную картину. К ним относятся ускорение и нагрев ионов, наблюдавшиеся при ЭЦ нагреве различными диагностическими методами на установках TJ-II [18] и TCV [19], а также аномальное рассеяние волны накачки «назад» со сдвигом вниз ее частоты, впервые обнаруженное на токамаке TEXTOR [20, 21]. Эти эффекты не могут быть объяснены в рамках существующих теоретических моделей [17] и требуют анализа различных сценариев низкопороговой неустойчивости ЭЦ волны с учетом реальных особенностей экспериментов в тороидальных установках, которые, по всей видимости, и приводили к значительному снижению порога возбуждения нелинейных явлений. Таким образом, как научный, так и практический интерес представляют исследование механизма, ответственного за значительное снижение порога возбуждения параметрического распада волны накачки, и развитие теории низкопороговых параметрических неустойчивостей.

Цели и задачи диссертационной работы

- 1) Развитие теоретических моделей флукуационной рефлектометрии, которые позволяют получить адекватную интерпретацию работы диагностики и реконструировать параметры дрейфовой турбулентности.
- 2) Развитие теории линейной трансформации нормальных мод в окрестности критической поверхности в трехмерно-неоднородной плазме с учетом шира магнитного поля и кривизны магнитной силовой линии. Анализ влияния низкочастотной дрейфовой турбулентности на эффективность линейной трансформации.
- 3) Развитие теории, описывающей распространение и поглощение электронных бернштейновских волн. Анализ их поведения в двумерно-неоднородной плазме токамаков с малым аспектным отношением с учетом слабых релятивистских эффектов.
- 4) Развитие теории низкопороговой параметрической неустойчивости, которая может объяснить аномальное отражение волны накачки и нагрев ионов в экспериментах по ЭЦ нагреву плазмы в тороидальных ловушках.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- 1) Впервые найдены критерии перехода рефлектометрической диагностики из линейного по амплитуде турбулентности режима рассеяния зондирующей волны, описываемого в борновском приближении, в нелинейный режим многократного малоуглового рассеяния и режим сильного рассеяния «назад».
- 2) Впервые развито корректное теоретическое обоснование различных видов флуктуационной рефлектометрии, применимых при линейном и нелинейном режимах рассеяния зондирующей волны. В линейном режиме работы радиальной корреляционной доплеровской рефлектометрии получено выражение для критического угла наклона зондирования, при котором происходит подавление вклада слабо локализованного малоуглового рассеяния в рефлектометрический сигнал. В нелинейном режиме многократного малоуглового рассеяния продемонстрирована пригодность доплеровской рефлектометрии для определения скорости вращения флуктуаций плотности, а также найдена связь длины корреляции сигналов радиальной корреляционной рефлектометрии с радиальной корреляционной длиной и амплитудой флуктуаций плотности.
- 3) На основе развитых теоретических моделей впервые предложены корректные методы реконструкции характеристик флуктуаций плотности из данных флуктуационной рефлектометрии и обоснована схема усиленного рассеяния в рефлектометрической диагностике.
- 4) Впервые развита теория линейной трансформации пучков электромагнитных волн в окрестности критической поверхности в реалистичной модели многомерно-неоднородной плазмы, выводы которой подтверждены сравнением с результатами численного моделирования.
- 5) Впервые найден критерий существенного влияния низкочастотной дрейфовой турбулентности на эффективность линейной трансформации в окрестности критической поверхности.
- 6) Впервые получено замкнутое выражение для дисперсионного уравнения электростатической электронной бернштейновской волны с учетом слабого релятивизма.
- 7) Впервые дана теоретическая интерпретация возбуждения плазменного

волновода для электронных бернштейновских волн, распространяющихся в экваториальной плоскости токамака с малым аспектным отношением, а также предсказано появление дополнительных областей прозрачности и заметное отражение падающей электронной бернштейновской волны от поверхности ЭЦ резонанса в случае немонотонного профиля модуля магнитного поля.

8) Впервые показана возможность низкопорогового возбуждения параметрических распадных неустойчивостей при ЭЦ нагреве плазмы необыкновенной волной на второй гармонике резонанса. Теория этих неустойчивостей, развитая при учете реальных особенностей профиля плотности плазмы и магнитного поля в тороидальных ловушках, позволяет объяснить ряд аномальных явлений, наблюдавшихся в экспериментах по дополнительному нагреву плазмы в токамаках и стеллараторах.

Научная и практическая значимость исследований, проведенных в диссертации, определяются широким спектром применений линейной и нелинейной трансформации пучков СВЧ волн в современной физике плазмы.

Развитые в главе 1 теоретические модели флуктуационной рефлектометрии позволили объяснить основные закономерности работы данной диагностики. Они используются в настоящее время для интерпретации экспериментов и восстановления параметров турбулентности на токамаках Tore-Supra (Франция), TCV (Швейцария), T-10 (НИЦ «Курчатовский институт»), ФТ-2, Глобус-М (оба - ФТИ им. А.Ф. Иоффе), DIII-D (США), ASDEX-Upgrade (Германия), стеллараторе TJ-II (Испания).

Анализ линейной трансформации пучков электромагнитных волн в окрестности критической поверхности с учетом трехмерной неоднородности и шира магнитного поля (глава 2) позволил развить существовавшие теоретические представления и заполнить пробел в теории линейной трансформации нормальных мод. Анализ распространения пучков ЭБ волн в двумерно-неоднородной плазме с учетом пространственной дисперсии и слабых релятивистских эффектов (глава 3) позволил развить существовавшие теоретические представления. Результаты этих двух глав используются для

интерпретации (MAST, Великобритания) и планирования (Глобус-М, ФТИ им. А.Ф. Иоффе) экспериментов в токамаках с малым аспектным отношением.

Анализ низкороговой нелинейной трансформации пучков электромагнитных волн ЭЦ диапазона частот (глава 4) позволил развить существовавшие теоретические представления и объяснить аномальные явления, наблюдавшиеся при ЭЦ нагреве плазмы. Результаты этой главы используются для интерпретации экспериментов по дополнительному нагреву на токамаках TCV (Швейцария), TEXTOR (Германия), ASDEX-Upgrade (Германия). Они также могут быть использованы для интерпретации экспериментальных данных на токамаке T-10 (НИЦ «Курчатовский институт») и стеллараторе L-2M (ИОФ РАН).

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов базируется на использовании методов, хорошо обоснованных математически, а так же их сравнением с экспериментальными данными и результатами численного моделирования. Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в 31 работе в рецензируемых изданиях, а также неоднократно докладывались на ведущих совещаниях и конференциях по тематике работы:

1. Ежегодные Конференции EPS по физике плазмы 2006 – 2015 гг. (2006 – 2014 гг. – стендовые презентации, в 2015 году – устный доклад);
2. Международная конференция "Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность" (MSS – 14), Москва, 24 – 27 ноября 2014 (приглашенный доклад);
3. 23rd и 25th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2010 и FEC 2014) (устные доклады);
4. 9th International Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications", July 24 – 30, 2014 (приглашенный доклад);
5. 20th topical conference «Radiofrequency power in plasmas», Sorrento, Italy, 25-28 June 2013 (приглашенный доклад);
6. 17th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclo-

tron Resonance Heating, 7 – 10 May 2012, Deurne, The Netherlands (стендовая презентация, приглашенный доклад);

7. 8th - 10th International Reflectometry Workshops 2007, 2009, 2011 (устные доклады);

8. 7th International Workshop “Strong Microwaves: Sources and Applications” July 27 – August 2, 2008 (устный доклад);

9. Ежегодные Международные (Звенигородские) конференции по физике плазмы и УТС (2006, 2008, 2009, гг. - стендовые презентации, 2007 г. – устный доклад, 2011, 2016 гг. – приглашенный пленарный доклад).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы из 152 наименований и 116 рисунков. Общий объем диссертации – 264 страницы.

Основное содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, кратко изложено содержание глав.

Глава 1 посвящена теории распространения и трансформации пучков электромагнитных волн в неоднородной турбулентной плазме в условиях сильной рефракции, а также ее применению для описания различных разновидностей флуктуационной рефлектометрии.

В **разделе 1.1** развита линейная по амплитуде флуктуаций теория полоидальной рефлектометрии (ПР) [1a]. В результате получены явные аналитические выражения для мощности сигнала, регистрируемого одной из приемных антенн, и корреляционной функции двух сигналов, которые регистрируются двумя приемными антеннами, разнесенными в полоидальном направлении. Развита метод реконструкции профиля флуктуаций плотности и их скорости полоидального вращения с учетом вклада малоуглового рассеяния в объеме плазмы в формирование рефлектометрического сигнала.

В **разделе 1.2** в рамках линейной модели рассеяния зондирующей вол-

ны изложено теоретическое обоснование радиальной корреляционной разновидности доплеровской рефлектометрии (РКДР) [2а], предполагающей корреляционные измерения при наклонном зондировании плазмы на двух близких частотах. Получено выражение для кросс-корреляционной функции двух сигналов CCF . Анализ этого выражения позволил получить критерий на угол наклона антенны $\sin^2 \vartheta > \sin^2 \vartheta_* = c / (2\omega l_{cx}) \sqrt{1 + w^4 \omega^2 / (2Lc)^2}$, где w - радиус зондирующего пучка, ω - частота зондирующей волны, l_{cx} - корреляционная длина, $L = \partial \ln n / \partial x|_{x_c}^{-1}$, x_c - положение отсечки, когда паразитный вклад малоуглового рассеяния экспоненциально подавлен и CCF пропорциональна пространственной корреляционной функции флуктуаций.

В разделе 1.3 развита нелинейная теория радиальной корреляционной рефлектометрии (РКР) [3а–5а]. Показано, что в случае линейного режима рассеяния, что соответствует условию $\delta n^2 / n_c^2 \cdot \omega^2 L l_{cx} / c^2 \cdot \ln(L / l_{cx}) \ll 1$, $n_c = m_e \omega^2 / (4\pi e^2)$, δn - амплитуда флуктуаций плотности, локальность измерений корреляционной функции сигналов в двух частотных каналах и частотного спектра турбулентности невысока. Кросс - корреляционная функция убывает по логарифмическому закону с увеличением расстояния между точками отсечки зондирующего излучения Δx : $CCF \propto \ln[\Delta x / l_{cx}]$, что согласуется с результатами, полученными как аналитически, так и численно без использования квазиклассического (ВКБ) приближения [22, 23]. В случае если уровень флуктуаций или размер трассы таковы, что выполняется неравенство

$$\frac{\delta n^2}{n_c^2} \frac{\omega^2 L l_{cx}}{c^2} \ln \frac{L}{l_{cx}} > 1, \quad (1)$$

рассеяние зондирующей волны находится в нелинейном режиме. В сильно нелинейном режиме (неравенство (1) становится строгим) кросс-корреляционная функции сигналов в двух частотных каналах в различные моменты времени, разделённые интервалом τ , имеет вид $CCF \propto \exp[-(\Delta x / l_{cx}^{ef})^2 - (\tau / t_{ef})^2]$, где для гауссовской функции распределения флуктуаций плотности по радиальным волновым векторам

$$\left(\frac{1}{l_{cx}^{ef}} \right)^2 = 2\sqrt{\pi} \frac{\omega^2 L}{c^2 l_{cx}} \frac{\delta n^2}{n_c^2}, \quad \frac{1}{t_{ef}^2} = \sqrt{\pi} \frac{\omega^2 L l_{cx}}{c^2 t_c^2} \frac{\delta n^2}{n_c^2} \ln \left[\frac{8L}{\pi l_{cx}} - \frac{\gamma}{2} + 1 \right],$$

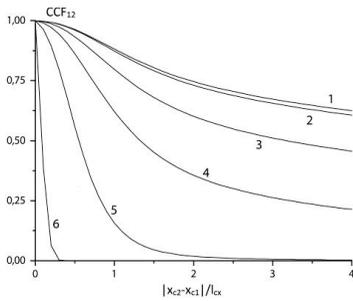


Рисунок 1. Зависимость корреляционной функции двух сигналов от расстояния между отсечками $\Delta x/l_{cx}$ для различных уровней турбулентности: $\delta n/n_c = (1) 10^{-4}$, $(2) 10^{-3}$, $(3) 3 \times 10^{-3}$, $(4) 5 \times 10^{-3}$, $(5) 10^{-2}$, $(6) 5 \times 10^{-2}$; $2\pi c/\omega = 0.52$ см, $l_{cx} = 2$ см, $x_c = 60$ см.

длины.

В разделе 1.4. развита нелинейная теория доплеровской рефлектометрии (ДР) [6а, 7а]. Показано, что в случае доминирования в сигнале ДР вклада многократного малоуглового рассеяния, сдвиг частотного спектра определяется соотношением $\bar{\omega}_{max} = \omega - 2Kv$, где v – специфическим образом усредненная по области распространения волны скорость полоидального вращения, $K = \omega \sin \vartheta / c$, ϑ – угол наклона антенны по отношению к направлению градиента плотности. Ширина частотного спектра зависит от амплитуды турбулентности и отличается от ширины в линейной ситуации.

В некоторых режимах работы рефлектометрической диагностики наблюдаются такие эффекты, как скачки времени задержки и фазы зондирующей волны [24], объяснение которых в рамках традиционной модели распространения зондирующей волны от антенны до поверхности отсечки и обратно возможно только в предположении быстрого и сильного изменения профиля плотности плазмы. Существует альтернативное объяснение, которое базируется на предположении, что причиной появления этих эффектов является сильно нелинейный режим брэгговского рассеяния «назад» (БРН). В разделе 1.5 найден критерий перехода БРН в этот режим [8а, 9а], сопро-

t_c – корреляционное время турбулентности, $\gamma = 0,5772$ – константа Эйлера. При этом измерения пространственных характеристик турбулентности являются локальными, но позволяют оценить не саму корреляционную длину турбулентности, а величину $l_{cx}^{1/2} / \delta n$. На рисунке 1 приведена зависимость CCF от расстояния между отсечками $\Delta x/l_{cx}$ для различных уровней турбулентности. Ширина частотного спектра рефлектометрического сигнала в сильно нелинейном режиме существенно превосходит ширину спектра турбулентности и зависит от её уровня и корреляционной

вождающийся скачком времени задержки зондирующей волны, $\delta n_m / n_c = c^2 \kappa / (\omega^2 l)$, где l – размер резонансного слоя, в котором происходит рассеяние «назад», κ – радиальный волновой вектор флуктуаций, приводящих к БРН.

В разделе 1.6 приведен анализ возможности восстановления спектров турбулентности по радиальным волновым числам флуктуаций по результатам радиальных корреляционных измерений, полученных при наклонном зондировании плазмы [10а]. Кроме того, дано описание 1) метода реконструкции радиального профиля флуктуаций плотности на основании измерений зависимости уровня флуктуаций фазы рефлектометрического сигнала от частоты зондирования [11а] и 2) схемы усиленного рассеяния [12а].

Глава 2 посвящена теории линейной трансформации пучков электромагнитных волн в окрестности критической поверхности в трехмерно-неоднородной турбулентной плазме с учетом шира магнитного поля и кривизны магнитной силовой линии.

В разделе 2.1 рассмотрен случай магнитного поля без шира и с прямыми силовыми линиями [13а,14а]. Показано, что учет трехмерной неоднородности модуля магнитного поля приводит к тому, что поверхности отсечки обыкновенной волны ($\varepsilon_{\xi\xi}^{\pm} = 0$) и необыкновенной волны ($\varepsilon_+ - N_{\xi 0}^2 = 0$, $N_{\xi 0} = \omega_{ce} / (\omega + \omega_{ce})|_{x_c}^{1/2}$) не являются как в одномерно-неоднородном случае плоскопараллельными, а их взаимное положение характеризуется углом 2α . Выше использованы обозначения: $\varepsilon_{\xi\xi}^{\pm}$, ε_+ – «холодные» (без учета теплового движения частиц) компоненты тензора диэлектрической проницаемости, x_c – координата критической поверхности. С учетом этого эффекта получена система уравнений, которая описывает взаимодействие обыкновенной и необыкновенной волны в окрестности критической поверхности x_c :

$$\left(\left| \frac{\partial \ln \varepsilon_+}{\partial x} \right|_{x_c} x + \left| \frac{\partial \ln \varepsilon_+}{\partial \eta} \right|_{\eta} + \left| \frac{\partial \ln \varepsilon_+}{\partial \xi} \right|_{x_c} \xi - i 2 N_{\xi 0} \frac{c}{\omega} \frac{\partial}{\partial \xi} \right) E_+ + \frac{N_{\xi 0}}{\sqrt{2}} \frac{c}{\omega} \left[i \frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial \eta} \right] E_{\xi} = 0,$$

$$\frac{N_{\xi 0}}{\sqrt{2}} \frac{c}{\omega} \left[i \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial \eta} \right] E_+ + \left| \frac{\partial \ln \varepsilon_{\xi\xi}^{\pm}}{\partial x} \right|_{x_c} x E_{\xi} = 0, \quad E_- = 0, \quad (2)$$

где, x, η, ξ – радиальная, поперечная и продольная координаты, E_{ξ} – продоль-

ная компонента электрического поля, E_{\pm} – компоненты циркулярно поляризованных полей, вращающихся в сторону вращения ионов и электронов. В системе (2) учтены только члены первого порядка малости по параметрам, определяемым неравенствами $c|\nabla \ln(E_{+, \xi})|/\omega \ll N_{\xi 0}$, $|\varepsilon_+ - N_{\xi 0}^2| \ll 1$, $|\varepsilon_{\xi \xi}| \ll 1$. Обобщая процедуру поиска функциональной подстановки, развитой в одномерном случае [10, 12], систему дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка (2) можно свести к уравнению в частных производных второго порядка, допускающему разделение переменных, решение которого при фиксированном знаке угла $2\alpha > 0$ можно представить как амплитуды волн, распространяющихся от границы внутрь плазмы I и в обратном направлении R :

$$I = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \phi_n(\nu) D_{i\nu_n^-} \left(\exp\left(i\frac{\pi}{4}\right) u \right), \quad R = i\sqrt{|\tan(\alpha)|} \sum_{n=0}^{\infty} C_n n \phi_{n-1}(\nu) D_{i\nu_{n-1}^-} \left(\exp\left(i\frac{\pi}{4}\right) u \right). \quad (3)$$

В выражении (3) ϕ_n – полиномы Эрмита, $D_{i\nu_{n-1}^-}$ – функция параболического цилиндра, $\nu = \sqrt[4]{\cos(2\alpha)}[-\sin\alpha x + \cos\alpha \eta]$, $u = \sqrt{2\cos(\alpha)}\sqrt[4]{\cos(2\alpha)}[\cos\alpha x + \sin\alpha \eta]$, C_n определяются граничными условиями, размер области непрозрачности определяется номером собственной поперечной моды и зависит от знака угла α : $\gamma_p^{\pm} = |\tan(\alpha)|(p+1/2 - \text{sign}(\alpha)/2)$, $p \in \mathbb{Z}$. В результате, получен коэффициент трансформации и отражения для каждой спектральной компоненты k_{ξ} и поперечной моды ϕ_n : $T = \exp(-2\pi\gamma_p^{\pm})$, $R = 1 - \exp(-2\pi\gamma_p^{\pm})$, которые удовлетворяют закону сохранения энергии и обладают свойством асимметрии $T(\alpha > 0)/T(\alpha < 0) = \exp(-2\pi|\tan\alpha|)$. Впервые полученные результаты были изложены в работе [25]. Найденное решение совпало с решением, полученным независимо и другим способом в работе [26], где в результате анализа модельной задачи в гипотетическом случае магнитного поля без полоидальной компоненты было впервые указано на наличие асимметрии коэффициентов трансформации. Далее модель работы [26] была развита в трудах [27–30].

В разделе 2.2 приведено сравнение результатов анализа, проведенного в разделе 2.1, с результатами численного моделирования и выяснена граница применимости теоретической модели [17a]. На рисунке 2 приведена зависимость отношения коэффициентов трансформации, полученных численно и аналитически для разных направлений тороидального магнитного поля, от абсолютного значения угла 2α между поверхностями отсечек. Изменение

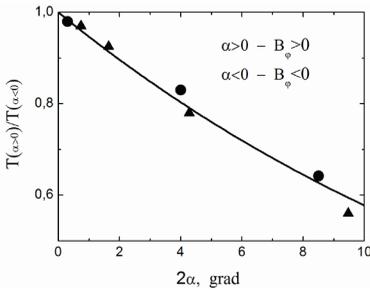


Рис. 2. Отношение коэффициентов трансформации для $B_\phi > 0$ и $B_\phi < 0$. Численное моделирование – 15 ГГц (кружки) и 30 ГГц (треугольники). Сплошная кривая – аналитическое выражение.

направления тороидального поля соответствует изменению знака угла α . Показано разумное согласие между предсказанием аналитической теории и результатом численного анализа.

В разделе 2.3 приведен анализ влияния шира магнитного поля и кривизны магнитной силовых линий на эффективность линейной трансформации пучков электромагнитных волн в окрестности критической поверхности [15а, 16а]. Поскольку на установках, использующих линейную трансформацию мод как способ возбуждения ЭБВ, имеет место сильная вытянутость магнитных поверхно-

стей и кривизна магнитной поверхности в области взаимодействия мод может считаться малой, то в отличие от работы [31], где анализировался случай круглых магнитных поверхностей, для которых кривизна может быть существенна, рассмотрена модель плоскостлой плазмы. В разделе получена система уравнений, которая описывает линейную трансформацию мод в окрестности критической поверхности и учитывает наличие шира магнитного поля и эффект кривизны магнитной силовой линии на магнитной поверхности. В результате решения этих уравнений получены интегральные выражения для амплитуд взаимодействующих полей. Найденное интегральное представление описывает эффект поворота поперечной компоненты волнового вектора волны в области трансформации из-за наличия шира и является разновидностью преобразования Габора, которое встречается при решении уравнений магнитной гидродинамики с учетом шира магнитного поля [32, 33]. Впервые оно было получено в работе [15а] для случая двумерно-неоднородной плазмы в пренебрежении кривизной магнитных силовых линий. Несколько позже по времени в работе [34] было найдено приближенное решение для амплитуд волн при малом шире магнитного поля, но для более общего случая трехмерно-неоднородной плазмы. Далее, в работе

[16a] была решена задача трансформации нормальных мод в трехмерно-неоднородной плазме с учетом шира магнитного поля и кривизны магнитной силовой линии на магнитной поверхности и получены выражения для взаимодействующих полей в том виде, в котором они приведены в диссертационной работе.

В разделе 2.4 приведен анализ влияния низкочастотной дрейфовой турбулентности на эффективность линейной трансформации пучков электромагнитных волн в окрестности критической поверхности без учета шира магнитного поля и кривизны магнитных силовых линий [18a]. Рассмотрен случай статистически однородных дрейфовых колебаний, которые имеют гауссовский спектр по волновым числам. В случае слабой турбулентности амплитуды волн, которые распространяются в экваториальной плоскости установки вдоль большого радиуса x в разных направлениях (a_i и a_r), можно описывать по теории возмущений: $a_{i,r} = a_{i,r}^{(0)} + a_{i,r}^{(1)} + \dots$, где $a_i^{(0)} = \exp(-ix'^2/2)$, $a_r^{(0)} = 0$ - решение в невозмущенной плазме, которое соответствует падению обыкновенной волны под оптимальным углом, $a_{i,r}^{(1)}$ - поправки к амплитуде волн, линейные по амплитуде флуктуаций плотности. Система уравнений для разных порядков теории возмущений имеет вид:

$$\begin{aligned} \left[i \frac{\partial}{\partial x'} - x' \right] a_i^{(j+1)}(x', k) + i q a_r^{(j+1)}(x', k) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dq}{\sqrt{2\pi}} \delta \tilde{n}(x', q) a_i^{(j)}(x, k - q), \\ \left[i \frac{\partial}{\partial x'} + x' \right] a_r^{(j+1)}(x', k) + i q a_i^{(j+1)}(x', k) &= - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dq}{\sqrt{2\pi}} \delta \tilde{n}(x', q) a_r^{(j)}(x, k - q), \end{aligned}$$

где $(k, q) = (k_n, q_n)l$ - безразмерные радиальный и полоидальный волновой вектор флуктуаций, $x' = x/l$, $\delta \tilde{n} = \delta n / n_c \cdot L / l$, $l = (Lc / \omega)^{1/2} (\omega_{ce}(x_c) / (2\omega))^{1/4}$ - размер области трансформации. В итоге, найдены коэффициент отражения $R = \sqrt{\pi} \alpha_{FS}(l_{cx}) l_{cx} L / l^2 < \delta n^2 > / n_c^2 + \pi \alpha_{BS}(l_{cx}) L^2 / l^2 < \delta n^2 > / n_c^2$, где первый и второй члены - вклады рассеяния «вперед» и «назад» в формирование отраженной волны и $\alpha_{FS,BS}$ - численные коэффициенты, и критерии перехода рассеяния («вперед» и «назад») в нелинейный режим:

$$\sqrt{\frac{< \delta n^2 >}{n_c^2}} \Big|_{FS}^{th} = \sqrt{\frac{1}{\pi \alpha_{FS}(l_{cx})}} \frac{l}{\sqrt{l_{cx} L}}, \quad \sqrt{\frac{< \delta n^2 >}{n_c^2}} \Big|_{BS}^{th} = \sqrt{\frac{1}{\pi \alpha_{BS}(l_{cx})}} \frac{l}{L}.$$

Надо отметить, что в работе [35] было проанализировано влияние квазиго-

герентного возмущения плотности на размер области непрозрачности и, как результат, на эффективность линейной трансформации. В тоже время, в работе [18а] был исследован брэгговский режим рассеяния взаимодействующих волн на низкочастотных флуктуациях плотности с учетом их случайно - го характера.

В главе 3 развита линейная теория распространения пучков электронных бернштейновских волн (ЭБВ) в двумерно-неоднородной плазме с учетом пространственной дисперсии и слабых релятивистских эффектов.

В разделе 3.1 в замкнутой форме получено дисперсионное уравнение электростатической ЭБВ для максвелловской функции распределения с учетом релятивистской поправки к циклотронной частоте [19а]:

$$1 + \frac{2\omega_{pe}^2}{k_{\perp}^2 v_{te}^2} \left[1 - \frac{\omega}{k_{\perp} v_{te}} X\left(\frac{\omega}{k_{\perp} v_{te}}\right) - \frac{\omega}{k_{\perp} v_{te}} Y\left(\frac{\omega}{k_{\perp} v_{te}}\right) \langle \cot \rangle \right] = 0,$$

где функции $X(\xi)$, $Y(\xi)$ – действительная и мнимая часть плазменной дисперсионной функции Z [36], $\langle \cot \rangle = \sum_{s=-\infty}^{\infty} \tilde{Z}(\Delta^{(s)}) / q\beta^2 \Delta^{(s)}$, где $\Delta^{(s)} = (q-s)/q\beta^2$, $N = k_{\parallel} c / (\omega\beta)$, k_{\parallel} , k_{\perp} – продольный и поперечный волновые вектора, $\beta = v_{te} / c$, $v_{te} = (2T_e / m_e)^{1/2}$, $q = \omega / \omega_{ce}$, $\tilde{Z} = 2 \int d\tau \exp(-\tau) / [(\tau - \tau_1)(\tau - \tau_2)]^{1/2}$ – обобщенная дисперсионная функция и $\tau_{1,2} = 2(N^2 - \Delta^{(s)} \mp N\sqrt{N^2 - 2\Delta^{(s)}})$.

В разделе 3.2 развита двумерная теория распространения и затухания ЭБВ в экваториальной плоскости токамаков с малым аспектным отношением [20а]. Согласно результатам расчетов поведение лучевых траекторий ЭБВ в окрестности экваториальной плоскости сферического токамака зависит от формы поверхности ЭЦ резонанса [6]. В случае вогнутой поверхности ЭЦ резонанса лучевые траектории ЭБВ демонстрируют регулярное осцилляторное поведение вокруг экваториальной плоскости, что делает возможным их аналитическое описание. Показано, в этом случае в окрестности экваториальной плоскости формируется волновод, параметры которого слабо меняются вдоль большого радиуса установки, а ЭБ волны распространяются в нем в форме собственных мод. Затухание собственных мод с малым собственным числом сильно отличается от того, что предсказывает квазиклассический анализ (анализ поведения лучевых траекторий). В то же время моды этого волновода с большим собственным числом могут быть

описаны в рамках квазиклассического приближения.

В разделе 3.3 рассмотрена теория распространения и затухания ЭВВ при немонотонном профиле модуля магнитного поля [21а], который часто встречается в равновесных магнитных конфигурациях в токамаках с малым аспектным отношением [7]. Показано, что в присутствии сильной неоднородности плотности плазмы и немонотонного профиля модуля магнитного поля возможно существование ЭВВ между поверхностью верхнего гибридного резонанса и гармониками ЭЦ резонанса ($p \geq 2$). Найдено приближенное дисперсионное уравнение для этих волн. Показано, что в случае низких ЭЦ гармоник, когда при описании ЭВВ нарушается квазиклассическое приближение, имеет место сильное отражение от ЭЦ слоя (для параметров токамака MAST до 20% мощности падающих ЭВВ).

В главе 4 изложена теория низкопороговой нелинейной трансформации пучков СВЧ волн. Приведено рассмотрение нескольких сценариев низкопорогового распада электромагнитной волны необыкновенной поляризации в присутствии немонотонного профиля плотности плазмы.

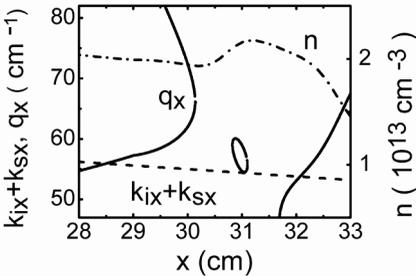


Рисунок 3. Дисперсионные кривые ИБ волны (сплошная линия) и профиль плотности (штрих пунктирная линия) [37]. Пунктир – $k_{ix} + k_{sx}$, $\Omega_0 = 0.86$ ГГц, $T_i = 500$ эВ.

[37]. Дополнительная локализация ИБВ в полоидальном направлении в экваториальной плоскости имеет место из-за двумерной неоднородности магнитного поля, что в итоге приводит к полному подавлению потерь ее энергии из области параметрического распада в двух направлениях и ведет к

В разделе 4.1 проанализирована низкопороговая неустойчивость необыкновенной волны накачки, приводящая к возбуждению 2D (3D) резонатора ионной бернштейновской волны (ИБВ) и необыкновенной волны, распространяющейся в обратном направлении [22а–25а]. Радиальная локализация ИБВ (рисунок 3) может иметь место в окрестности О – точки магнитного острова, где профиль плотности плазмы имеет локальный максимум

значительному (на 4 порядка) снижению порога возбуждения конвективной неустойчивости. Для типичных условий экспериментов на токамаке TEXTOR [20, 21] и вариации плотности в острове $\delta n/n = 0.11$ [37] для фундаментальной ИБ моды тороидального волновода получена следующая оценка порога конвективной параметрической неустойчивости: $P_{th} \approx 200$ кВт.

Причиной формирования немонотонного профиля плотности плазмы может быть не только присутствие магнитного острова, но и особенности удержания или локализация источника ионизации, а так же сам мощный ЭЦ нагрев, приводящий к аномальному конвективному выносу плазмы [18, 19]. При наличии такого профиля плотности в токамаке двумерный плазменный волновод ИБ волн превращается в резонатор в силу аксиальной симметрии системы. Если при этом ЭЦ волна накачки пересекает магнитную поверхность, соответствующую локальному максимуму плотности, в окрестности точки, соответствующей минимуму модуля магнитного поля, то возможно параметрическое возбуждение этого резонатора и развитие абсолютной неустойчивости. В разделе получен инкремент и порог возбуждения абсолютной параметрической распадной неустойчивости в виде условия баланса мощности параметрической накачки и потерь дочерних волн.

В разделе 4.2 рассмотрены экспериментальные условия, облегчающие

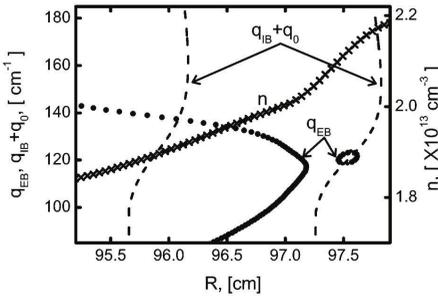


Рисунок 4. Дисперсионные кривые ЭБ волны q_{EB} (точки), дисперсионные кривые ИБ волны q_{IB} (пунктир), смещенные вверх на величину волнового вектора необыкновенной ЭЦ волны $k_0 = 17$ см⁻¹. (правая и нижняя оси): профиль плотности (сплошная линия с крестами) [19].

возбуждение параметрических распадных неустойчивостей при ЭЦ нагреве плазмы на второй гармонике ЭЦ резонанса в токамаках и стеллараторах [26а, 27а], что, в результате, делает возможным аномальный нагрев ионной компоненты в условиях, когда энергообмен между электронами и ионной компонентой пренебрежимо мал [18, 19]. Показано, что в случае немонотонного радиального профиля плотности плазмы при прохождении пучка волн необыкновенной поляризации вбли-

зи экваториальной плоскости установки может происходить параметрическое возбуждение резонансов ЭБ волн (рисунок 4 иллюстрирует локализацию волны в радиальном направлении). Одновременно генерируются ИБ волны, распространяющиеся из области параметрического распада к ближайшей ионной циклотронной гармонике, где они поглощаются ионами. Порог возбуждения раскачиваемой при этом конвективной неустойчивости определяется конвективными потерями дочерней ИБВ и дифракционными потерями ЭБВ и может быть существенно превышен в современных экспериментах по ЭЦ нагреву плазмы в тороидальных ловушках. Кроме того, в силу аксиальной симметрии системы возможно возбуждение трехмерного резонатора ЭБ волн и развитие абсолютной неустойчивости. Порог её возбуждения найден в явном виде: $\gamma_0^2|_{th} \approx v_E v_i^* V_{damp} / V_{PDI}$. Здесь γ_0^2 – квадрат инкремента неустойчивости в однородной плазме, v_i^* – характеризует время потерь ИБВ из области распада, V_{PDI} / V_{damp} – отношение объемов, где происходит распад и где важную роль играет затухание (v_E). Для типичных параметров экспериментов на токамаке TCV [19] порог возбуждения параметрической неустойчивости составляет 12 кВт и инкремент неустойчивости равен $\gamma \approx 10^5 \text{сек}^{-1}$.

В разделе 4.3 рассмотрен механизм низкороговой неустойчивости параметрического распада пучка ЭЦ волн необыкновенной поляризации в турбулентной плазме [28а]. На нелинейной стадии развития дрейфовых неустойчивостей возможно возбуждение долго живущих структур, – филаментов, дрейфовых вихрей, – вытянутых, как правило, вдоль магнитной силовой линии и локализованных в поперечном направлении. Плотность плазмы в таких структурах выше фоновой. В силу этого, они могут служить как естественные объекты, которые могут в присутствии неоднородного магнитного поля приводить к трехмерной локализации ЭБ волн. В этом случае при падении необыкновенной волны в экваториальной плоскости на такой объект возможно параметрическая раскачка резонатора ЭБВ и возбуждение низкочастотных продольных колебаний, что можно интерпретировать как низкороговую абсолютную неустойчивость волны накачки. В случае типичного для токамака TCV разряда в дейтерии с малой примесью водорода ($n_H / n_D = 5\%$, $T_{D,H} = 0.3 \text{кэВ}$) порог возбуждения абсолютной неустойчивости

составляет $P_0^{th} = 7.4 \text{ кВт}$. При мощности нагрева $P_i = 0.75 \text{ МВт}$ инкремент неустойчивости равен $\gamma = 0.6 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$. Низкочастотные колебания, которые возбуждаются в результате неустойчивости, – это медленные ионные звуковые волны. Эти волны испытывают сильное бесстолкновительное затухание на ионах и таким образом вкладывают энергию в ионную компоненту, что может объяснить аномальный нагрев ионов, часто наблюдаемый в экспериментах по ЭЦ нагреву плазмы.

В разделе 4.4 рассмотрена низкопороговая двухплазменная параметрическая неустойчивость [29а–31а]. Показано, что при немонотонном профиле плотности плазмы имеет место радиальная локализация дочерних верхнегибридных (ВГ) волн. Это приводит к полному подавлению их энергетических потерь из области параметрического распада вдоль направления неоднородности плазмы. Продемонстрировано, что радиально запертые ВГ плазмоны, распространяющиеся на магнитной поверхности в противоположные стороны, оказываются дополнительно локализованными в пучке накачки. В результате возбуждается абсолютная неустойчивость. Порог ее возбуждения (десятки кВт) существенно ниже, чем в случае монотонного профиля плазмы (несколько МВт), а оценка инкремента дает значение – $\gamma = 2 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$. В качестве механизма насыщения этой неустойчивости рассматривается каскад распадов дочерних ВГ волн, приводящий к возбуждению вторичных ВГ волн и низкочастотных колебаний. Результаты численного моделирования свидетельствуют о том, что для типичных условий токамака TEXTOR [20, 21] до 25% мощности накачки рассеивается или поглощается аномально. Показано, что нелинейное взаимодействие различных дочерних волн, возбуждаемых в результате абсолютной двухплазменной неустойчивости необыкновенной волны и каскадного механизма ее насыщения, может приводить к генерации необыкновенной волны, частота которой смещена вниз относительно частоты волны накачки. Этот механизм позволяет воспроизвести в деталях спектр аномально рассеянных волн, измеренный в эксперименте [21], и с хорошей точностью оценить мощность принимаемых сигналов.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы работы.

Основные результаты работы

1) Найдены критерии перехода рефлектометрии из линейного режима рассеяния зондирующей волны, описываемого в борновском приближении, в сильно нелинейный режим рассеяния зондирующей волны «вперед» и «назад». Впервые развито последовательное теоретическое описание различных видов флуктуационной рефлектометрии при линейном и нелинейном режиме рассеяния зондирующей волны. В итоге, полученные результаты позволили объяснить основные закономерности работы данной диагностики, развить методы реконструкции параметров и профилей флуктуаций плотности, а также их полоидальной скорости вращения.

2) Решена задача линейной трансформации нормальных мод в окрестности критической поверхности в трехмерно-неоднородной плазме. Получены уравнения, описывающие электрические поля взаимодействующих волн с учетом шира магнитного поля и кривизны магнитной силовой линии. В результате решения этих уравнений получены интегральные выражения для амплитуд взаимодействующих полей, коэффициенты трансформации и отражения. Основные предсказания теоретической модели подтверждены сравнением с результатами численного моделирования. Получен критерий на амплитуду флуктуаций, когда рассеяние взаимодействующих волн переходит в нелинейный режим, что приводит к деградации эффективности трансформации. В итоге, это позволило развить существовавшие теоретические представления и заполнить пробел в теории линейной трансформации нормальных мод.

3) Получена замкнутая форма представления дисперсионного уравнения электронных бернштейновских волн с учетом слабых релятивистских эффектов. Показано, что в случае вогнутых магнитных поверхностей, свойственных равновесным магнитным конфигурациям в токамаках с малым аспектным соотношением, для ЭБВ в экваториальной плоскости установки возбуждается плазменный волновод, параметры которого слабо меняются вдоль большого радиуса. Показано, что в равновесной магнитной конфигу-

рации с немонотонным радиальным профилем модуля магнитного поля, которая может реализовываться в токамаках с малым аспектным соотношением, для ЭБВ существует дополнительная область прозрачности между поверхностью верхнего гибридного резонанса и поверхностью гармоника электронного циклотронного резонанса. Получено дисперсионное уравнение, адекватно описывающее ЭБВ в этой области. В результате, развиты существовавшие теоретические представления и дано объяснение поведение ЭБВ в плазме токамаков с малым аспектным отношением.

4) Рассмотрены сценарии низкопороговой параметрической неустойчивости электронных циклотронных волн необыкновенной поляризации с учетом реальных особенностей профиля плотности плазмы. Для каждого из этих сценариев получены выражения для порога и инкремента неустойчивости волны накачки. В результате, развиты существовавшие теоретические представления и предложен параметрический механизм, объясняющий аномальное отражение волны накачки и нагрев ионов в экспериментах по ЭЦ нагреву плазмы в тороидальных ловушках.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Формулировка критерия перехода флуктуационной рефлектометрии в нелинейные режимы многократного малоуглового рассеяния и сильного брэгговского рассеяния «назад».
2. Вывод выражения, связывающего длину корреляции сигналов радиальной корреляционной рефлектометрии с радиальной корреляционной длиной и амплитудой флуктуаций плотности при нелинейном режиме рассеяния.
3. Вывод системы уравнений, которые описывают поля электромагнитных волн, распространяющихся под углом к магнитному полю и линейно взаимодействующих в окрестности критической поверхности, полученных с

учетом трехмерной неоднородности плазмы, шира магнитного поля и кривизны магнитной силовой линии; решение этой системы и коэффициенты прохождения и отражения.

4. Вывод уравнений для электронной бернштейновской волны в плазме токамака с малым аспектным отношением в окрестности экваториальной плоскости и при наличии немонотонного профиля модуля магнитного поля.

5. Определение параметрических механизмов низкопорогового аномального отражения и поглощения волны накачки в экспериментах по ЭЦ нагреву плазмы в тороидальных ловушках. Вывод выражения для порога и инкремента низкопороговых параметрических неустойчивостей необыкновенной волны, приводящих при учете реальных особенностей профиля плотности плазмы к возбуждению плазменного резонатора ионной бернштейновской волны и отраженной необыкновенной дочерней волны, а также плазменного резонатора электронной бернштейновской волны и ионной бернштейновской волны.

6. Определение механизма трехмерной локализации дочерних верхнегибридных плазмонов в присутствии немонотонного профиля плотности плазмы и пучка накачки, ответственного за возбуждение низкопороговой абсолютной параметрической неустойчивости двухплазмонного распада. Вывод выражения для порога и инкремента этой неустойчивости. Определение каскадного механизма её насыщения и уровня аномального поглощения и рассеяния назад волны накачки.

Личный вклад

Во всех работах, выполненных в соавторстве, диссертанту принадлежит участие в постановке задачи, аналитическое решение, участие в написании статьи. В работах, вошедших в главу 4, диссертанту принадлежат также численные расчёты.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

- [1a] Gusakov E.Z., **Popov A.Yu.** Measurements localization in poloidal correlation reflectometry // Nucl. Fusion. - 2006. - Vol. 46. - P.S829.
- [2a] Gusakov E., Irzak M. and **Popov A.** Radial correlation reflectometry at oblique probing wave incidence (linear scattering theory predictions) // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2014. - Vol. 56. - P.025009.
- [3a] Gusakov E.Z., **Popov A.Yu.** Non-linear theory of fluctuation reflectometry // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2002. -Vol. 44. - P.2327.
- [4a] Gusakov E.Z., **Popov A.Yu.** Two-dimensional non-linear theory of radial correlation reflectometry // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2004. - Vol. 46. - P.1393.
- [5a] Leclert G., Heurax S., Gusakov E.Z., **Popov A.Yu.**, Boucher I. and Vermare L. Full-wave test of the radial correlation reflectometry analytical theory in linear and nonlinear regimes // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2006. - Vol. 48. - P.1389.
- [6a] Gusakov E.Z., Surkov A.V., **Popov A.Yu.** Multiple scattering effect in Doppler reflectometry // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2005. - Vol. 47. - P.959.
- [7a] da Silva F., Heurax S., Gusakov E.Z., **Popov A.Yu.** A Numerical Study of Forward - and Backscattering Signatures on Doppler-Reflectometry Signals // Plasma Science, IEEE Transactions. - 2010. - Vol. 38. - P.2144.
- [8a] Gusakov E.Z., Heurax S. and **Popov A.Yu.** Strong Bragg backscattering in reflectometry // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2009. - Vol.51. - P.065018.
- [9a] Heurax S., Gusakov E., **Popov A.**, da Silva F., Irzak M. Simulations on the Role of the Resonance of the Probing Wave on Reflectometry Measurements in Fluctuating Plasmas // Plasma Science, IEEE Transactions. - 2010. - Vol.38. - P.2150.
- [10a] Gusakov E., Irzak M., **Popov A.** and Teplova N. Two dimensional modeling of turbulence wave number spectra reconstruction from radial correlation reflectometry data // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2015. - Vol.57. - P.075009.
- [11a] Gusakov E., Heurax S., **Popov A.** and Schubert M. Reconstruction of the turbulence radial profile from reflectometry phase root mean square measurements // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2012. - Vol.54. - P.045008.

- [12a] Gusakov E.Z., Heurax S., Irzak M. and **Popov A.Yu.** Possibility of the giant scattering enhancement due to wave trapping in the reflectometry experiment // Phys. Scr. - 2011. - Vol.84. - P.045504.
- [13a] **Popov A.Yu.**, Piliya A.D. On O-X mode conversion in a cold magnetized 2D inhomogeneous plasma in the electron cyclotron frequency range // Plasma Phys. Reports. - 2007. - Vol.33. - P.53.
- [14a] **Popov A.Yu.** On O-X mode conversion in spherical tokamaks // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2007. - Vol.49. - P.1599.
- [15a] **Popov A.Yu.** On O-X mode conversion in 2D inhomogeneous plasma with a sheared magnetic field // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2010. - Vol.52. - P.035008.
- [16a] **Popov A.** On O-X mode conversion in a 3D inhomogeneous plasma // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2011. - Vol.53. - P.065016.
- [17a] Irzak M.A., **Popov A.Yu.** 2D Modeling of the O-X conversion in toroidal plasmas // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2008. - Vol.50. - P.025003.
- [18a] **Popov A.** Anomalous reflection of electromagnetic waves at O-X mode conversion in 2D inhomogeneous turbulent plasma // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2015. - Vol.57. - P.025010.
- [19a] Piliya A.D., **Popov A.Yu.** and Tregubova E.N. Propagation and damping of electron Bernstein waves with small n_{\parallel} in inhomogeneous plasma // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2003. - Vol.45. - P.1309.
- [20a] Piliya A.D., **Popov A.Yu.** and Tregubova E.N. Electron Bernstein waves in the mid-plane region of a spherical tokamak // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2005. - Vol.47. - P.379.
- [21a] Piliya A.D., **Popov A.Yu.** and Tregubova E.N. Electron Bernstein waves in a spherical tokamak with a magnetic well // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2005. - Vol.47. - P.2029.
- [22a] Гусаков Е.З., **Попов А.Ю.** Низкопороговые параметрические распадные неустойчивости в экспериментах по ЭЦ нагреву в тороидальных ловушках // Письма ЖЭТФ. - 2010. - Т.91. - С.724.
- [23a] Gusakov E.Z., **Popov A.Yu.** Low Threshold Parametric Decay Backscattering Instability in Tokamak Electron Cyclotron Resonance Heating Experiments // Phys. Rev. Lett. - 2010. - Vol.105. - P.115003.

- [24a] Gusakov E.Z., **Попов А.Ю.** Low Threshold Parametric Decay Instabilities in ECRH experiments at toroidal devices // Nuclear Fusion. - 2011. - Vol.51. - P.073028.
- [25a] Гусаков Е.З., **Попов А.Ю.** Низкопороговые абсолютные параметрические распадные неустойчивости в экспериментах по электронному циклотронному нагреву в токамаках // Письма ЖЭТФ. - 2011. - Т.94. - С.301.
- [26a] **Попов А.Ю.**, Гусаков Е.З., Савельев А.Н. О низкопороговом параметрическом механизме аномального поглощения мощности в экспериментах по ЭЦ нагреву плазмы в тороидальных ловушках // Письма ЖЭТФ. - 2012. - Т.96. - С.178.
- [27a] Gusakov E., **Попов А.** On the possibility of low-threshold anomalous absorption in tokamak 2nd-harmonic electron cyclotron resonance heating experiments // EPL. - 2012. - Vol.99. - P.15001.
- [28a] Gusakov E.Z., **Попов А.Ю.**, Saveliev A.N. Trapping of electron Bernstein waves in drift-wave eddies and parametric decay instability at second harmonic ECRH in toroidal devices // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2014. - Vol.56. - P.015010.
- [29a] **Попов А.Ю.**, Гусаков Е.З. О возможности снижения порога неустойчивости параметрического распада необыкновенной волны на две верхнегибридные в неоднородной плазме // ЖЭТФ. - 2015. - Т.147. - С.165.
- [30a] **Попов А.Ю.** and Gusakov E.Z. Low-threshold absolute two-plasmon decay instability in the second harmonic electron cyclotron resonance heating experiments in toroidal devices // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2015. - Vol.57. - P.025022.
- [31a] **Попов А.Ю.**, Гусаков Е.З. Насыщение низкопороговой двухплазменной параметрической неустойчивости необыкновенной волны в неоднородной плазме // ЖЭТФ. - 2015. - Т. 148. - С. 415.

Список цитируемой литературы

- [1] Doyle E., Lehecka T., Luhmann N. et. al. Reflectometry density fluctuation measurements on DIII-D // Rev. Sci. Instrum. - 1990. - Vol.61. - P.3016.
- [2] Mazzucato E., Nazikian R. Radial scale length of turbulent fluctuations in the main core of TFTR plasmas // Phys. Rev. Lett. - 1993. - Vol.71. - P.1840.

- [3] Costley A., Crippwell P., Prentice R., Sips A. Recent developments in microwave reflectometry at JET // *Rev. Sci. Instrum.* - 1990. - Vol.61. - P.2823.
- [4] Laqua H.P., Erckmann V., Hartfufi H.J. et.al. Electron Bernstein Wave Emission from an Overdense Plasma at the W7-AS Stellarator // *Phys. Rev. Lett.* - 1997. - V. 78. - P. 3467.
- [5] Laqua H.P., the W7-AS Team, and ECRH Group. Electron Bernstein wave heating and emission via the OXB process at W7-AS // *Plasma Phys. Cont. Fusion.* - 1999. - Vol. 41. - P. A273.
- [6] Shevchenko V., Baranov Y., O'Brien M., and Saveliev A. Generation of Noninductive Current by Electron-Bernstein Waves on the COMPASS-D Tokamak // *Phys. Rev. Lett.* - 2002. - Vol. 89. - P. 265005.
- [7] Jones B., Taylor G., Efthimion P. and Munsat T. Measurement of the magnetic field in a spherical torus plasma via electron Bernstein wave emission harmonic overlap // *Phys. Plasmas.* - 2004. - Vol. 11. - P.1028.
- [8] Weitzner H. and Batchelor D.B. Conversion Between Cold Plasma Modes in an Inhomogeneous Plasma // *Phys. Fluids.* - 1979. - Vol. 22. - P. 1355.
- [9] Mjølhus E. Coupling to z mode near critical angle // *J. Plasma Phys.* - 1984. - Vol. 31. - P. 7.
- [10] Жаров А.А. Линейная трансформация электромагнитных волн в магнитоактивной плазме вблизи поверхности критической концентрации // *Физика плазмы.* - 1984. - Т. 10. - С. 1109.
- [11] Токман М.Д. О линейной трансформации электромагнитных волн в магнитоактивной плазме при распространении под углом к градиенту концентрации // *Физика плазмы.* - 1985. - Т. 10. - С. 1205.
- [12] Тимофеев А.В. Волны в плазме в магнитном поле вблизи критической поверхности // *УФН.* - 2004. - Т. 174. - С. 609.
- [13] Weitzner H. O-X mode conversion in an axisymmetric plasma // *Phys. Plasmas.* - 2004. -Vol. 11. - P. 866.
- [14] Cairns R.A. and Lashmore-Davies C.N. The prospects for electron Bernstein wave heating of spherical tokamaks // *Phys. Plasmas.* - 2000. - Vol. 7. - P. 4126.
- [15] Shkarofsky I.P. Dielectric tensor in Vlasov plasmas near cyclotron harmonics // *Phys. Fluids.* - 1966. - Vol. 9. - P. 561.

- [16] J. Garcia J., Artaud J. F., Basiuk V. et al. RF-driven advanced modes of ITER operation // AIP Conf. Proc. - 2009. - Vol. 1187. - P. 31.
- [17] Cohen B.I., Cohen R.H., Nevins W.M. and Rognlien T.D. Theory of free-electron-laser heating and current drive in magnetized plasmas // Rev. Mod. Phys. - 1991. - Vol. 63. - P. 949.
- [18] Rapisarda D., Zurro B., Tribaldos V. et. al. The role of a fast ion component on the heating of the plasma bulk // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2007. - Vol. 49. - P. 309.
- [19] Karpushov A.N., Duval B.P., Goodman T.P. et.al. // Proceedings of the 33rd EPS Conference on Plasma Physics, Rome, Italy, Rome, 19 - 23 June, 30I. - 2006. - P-1.152.
- [20] Westerhof E., Nielsen S., Oosterbeek J.W. et. al. Strong scattering of high power millimeter waves in tokamak plasmas with tearing modes // Phys. Rev. Lett. - 2009. - Vol. 103. - P. 125001.
- [21] Nielsen S.K., Salewski M., Westerhof E. et. al. Experimental characterization of anomalous strong scattering of mm - waves in TEXTOR plasmas with rotating islands // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2013. - Vol. 55. - P. 115003.
- [22] Gusakov E.Z., Tyntarev M.A. The two-dimensional theory of reflectometry diagnostics of plasma fluctuations // Fusion Engineering and Design. - 1997. - Vol. 34-35. - P.501.
- [23] Hutchinson I. One-dimensional full-wave analysis of reflectometry sensitivity and correlations // Plasma Phys. Control Fusion. - 1992. - Vol. 34. - P. 1225.
- [24] Clairet F., Bottreau C., Chateau J.M. and Sabot R. Advances of the density profile reflectometry on TORE SUPRA // Rev. Scient. Instrum. - 2003. - Vol. 73. - P. 1481.
- [25] Попов А.Ю., Пилюк А.Д. О-Х трансформация в двумернонеоднородной плазме // Тезисы Докладов XXXIII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС г. Звенигород, 13-17 февраля 2006 г. ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН» - с. 71.
- [26] Господчиков Е.Д., Суворов Е.В. О-Х трансформация в двумернонеоднородной магнитоактивной плазме // Тезисы Докладов XXXIII Звени-

городской конференции по физике плазмы и УТС г. Звенигород, 13-17 февраля 2006 г. ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН» - с.323.

[27] Gospodchikov E.D., Shalashov A.G., Suvorov E.V. On Influence of 2D Inhomogeneity on Electromagnetic Mode Conversion near the Cut Off Surfaces in Magnetized // Plasmas Plasma Physics and Controlled Fusion. - 2006. - Vol. 48. - P. 869.

[28] Шалашов А.Г., Господчиков Е.Д., Суворов Е.В. О структуре волновых полей в области линейного взаимодействия О- и Х- волн в двумерно-неоднородной магнитоактивной плазме // ЖЭТФ. - 2006. - Т. 130(3). - С. 544.

[29] Shalashov A.G. and Gospodchikov E.D. On perfect O–X mode conversion near the cut-off surfaces in magnetized plasmas // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2008. - Vol. 50. - P. 045005.

[30] Shalashov A.G. and Gospodchikov E.D. Linear coupling of electromagnetic waves in gyrotropic media // Phys. Rev. E. - 2008. - Vol. 78. - P. 065602.

[31] 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 Phys. Control. Fusion. - 2012. - Vol. 54. - P. 045009.

[32] Nazarenko S. On exact solutions for near-wall turbulence theory // Physics Letters A. - 2000. - V. 264 - P. 444.

[33] Kim E. and Dubrulle B. Turbulent transport and equilibrium profiles in two-dimensional magnetohydrodynamics with background shear // Physics of Plasmas. - 2001. - V. 8. - P. 813.

[34] Shalashov A.G. and Gospodchikov E.D. On O–X mode conversion near the cut-off surfaces in 3D sheared magnetic field // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2010. - Vol. 52. - P.115001.

[35] Shalashov A.G., Gospodchikov E.D. Theory of the ordinary and extraordinary mode coupling in fluctuating plasma // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2014. - Vol. 56. - P. 25011.

[36] Swanson D.G. Plasma waves // Boston: Academic Press Inc. - 1989.

[37] Kantor M.Yu., Donne A.J.H., Jaspers R. et. al. Thomson scattering system on the TEXTOR tokamak using a multi-pass laser beam configuration // Plasma Phys. Control. Fusion. - 2009. -Vol. 51. - P. 055002.