

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт
общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук

Академик РАН

_____ И.А. Щербаков

" " марта 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук на диссертацию Попова А.Ю. «Теория распространения и трансформации микроволновых пучков в неоднородной турбулентной плазме», представленную в диссертационный совет Д 002.205.03 на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Рецензируемая диссертация Попова А.Ю. «Теория распространения и трансформации микроволновых пучков в неоднородной турбулентной плазме» посвящена развитию теории линейной и нелинейной трансформации микроволн (СВЧ) в плазме тороидальных установок – токамаков и стеллараторов. Приняты во внимание двумерная и трехмерная неоднородность плазмы, реальный профиль ее параметров, эффекты дифракции и рефракции пучка и присутствие в плазме низкочастотной турбулентности.

Нелинейная трансформация микроволн лежит в основе коллективного рассеяния зондирующих СВЧ пучков, для которых в плазме существует область с сильной рефракцией. Такое рассеяние широко используется как метод диагностики плазмы для получения информации о турбулентности. Для интерпретации данных, полученных с помощью различных разновидностей этого метода, ранее использовались упрощенные модели, предполагающие линейный характер рассеяния зондирующей волны и связывающие рефлектометрический сигнал исключительно с флуктуациями плотности плазмы вблизи поверхности отсечки. Влияние на рефлектометрический сигнал таких эффектов, как нелокальное малоугловое рассеяние, переход диагностики в нелинейный режим и обратное

рассеяние на коротковолновой турбулентности, учитывалось только при численном моделировании. Поэтому развитие линейной и нелинейной модели флуктуационной рефлектометрии и разработка математических процедур восстановления спектров и радиальных профилей флуктуаций плотности являются актуальными задачами.

Линейная трансформация пучков СВЧ волн играет ключевую роль в методе нагрева плазмы, основанном на использовании электронных бернштейнских волн (ЭБВ). Этот метод используется при плотностях плазмы выше критической, когда применение традиционной схемы нагрева плазмы 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 двухмерной модели плазмы распадается на две. Первая из них – построение теории линейной трансформации быстрых волн в окрестности критической поверхности с учетом реальной неоднородности плазмы. Эта задача была ранее проанализирована лишь в рамках приближения одномерно-неоднородной плазмы, что не учитывает ряда эффектов. Это делает актуальным развитие теории линейной трансформации мод в реалистичной геометрии с учетом двухмерной, а для стелларатора – трехмерной, неоднородности плазмы. Вторая задача – развитие теории распространения и поглощения ЭБВ в двухмерно-неоднородной плазме с учетом пространственной дисперсии и релятивистских эффектов. ЭБВ является сильно замедленной плазменной модой с весьма малой длиной волны, и для ее описания обычно достаточно ограничиться потенциальным приближением. При этом практический интерес представляет получение компактного дисперсионного уравнения ЭБВ в приближении слабого релятивизма, пригодное для применения в теоретическом анализе. Характер распространения и поглощения ЭБВ в токамаках с малым аспектным отношением не был теоретически исследован ранее. Поведение ЭБВ в таких установках может значительно отличаться от их поведения в традиционных токамаках с большим аспектным отношением. Таким образом, рассмотрение обеих задач является весьма актуальным.

ЭЦ нагрев плазмы – 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 как для нагрева электронов плазмы, так и для контроля и подавления неоклассической тиринг-моды. Согласно общепринятым представлениям, распространение ЭЦ волн и их поглощение в плазме хорошо описываются в рамках линейной теории. Теоретический анализ параметрических распадных неустойчивостей ЭЦ волн, выполненный в предположении

монотонных профилей плотности плазмы, предсказывает высокий порог их возникновения, на несколько порядков превышающий мощность современных гиротронов. Вместе с тем в последнее время появились экспериментальные данные, которые не укладываются в стандартную теоретическую модель, – это ускорение и нагрев ионов, аномальное отражение греющего излучения назад, сопровождающееся уменьшением частоты волны. Таким образом, исследование нелинейных процессов, сопровождающих СВЧ нагрев и возбуждение параметрических распадных неустойчивостей волны накачки, с учетом реальных особенностей эксперимента, является актуальной задачей.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Теоретические модели флуктуационной рефлектометрии, развитые Поповым А.Ю. в первой главе диссертации, позволили объяснить основные закономерности работы данной диагностики и развить методы реконструкции параметров и профилей флуктуаций плотности и их полоидальной скорости вращения.

Во второй главе автором проведен анализ линейной трансформации обыкновенной СВЧ волны в необыкновенную волну с учетом трехмерной неоднородности и шира магнитного поля. Это позволило Попову А.Ю. развить теоретические представления и заполнить пробел в теории линейной трансформации нормальных мод.

Основные следствия теоретической модели подтверждены их сравнением с результатами полноволнового моделирования. Анализу поведения ЭБВ в двухмерно-неоднородной плазме с учетом пространственной дисперсии и слабых релятивистских эффектов посвящена третья глава. Диссертантом развиты теоретические представления и объяснены эффекты, наблюдавшиеся при полноволновом численном моделировании.

В четвертой главе диссертации Поповым А.Ю. предложен параметрический механизм, объясняющий аномальное отражение волны накачки и аномальный нагрев ионов в экспериментах по ЭЦ нагреву плазмы в тороидальных магнитных ловушках. Рассмотрены разные сценарии низкопороговой параметрической неустойчивости ЭЦ волн необыкновенной поляризации с учетом реальных особенностей профиля плотности плазмы. Для ряда сценариев получены выражения для порога и инкремента неустойчивости волны накачки.

Основные положения диссертации Поповы А.Ю., выносимые на защиту, обладают новизной. Результаты диссертации вносят существенный вклад в развитие теории линейной и нелинейной трансформации электромагнитных СВЧ волн в замагниченной плазме. Новые результаты, полученные Поповым А.Ю. и представленные в диссертации, представляют

практический интерес, и могут быть применены для анализа линейной и нелинейной трансформации пучков СВЧ волн в современной физике плазмы. Результаты Попова А.Ю. используются в настоящее время для интерпретации экспериментов на токамаках Tore-Supra (Франция), TCV (Швейцария), T-10 (Россия, НИЦ «Курчатовский институт»), ФТ-2 (Россия, ФТИ им. А.Ф. Иоффе), DIII-D (США), стеллараторе TJ-II (Испания), MAST (Великобритания) и Глобус-М (Россия, ФТИ им. А.Ф. Иоффе), TEXTOR (Германия), ASDEX-U (Германия).

Имеются следующие замечания.

1. На рисунке 2.2 (стр. 118) неверно изображено положение отсечки для медленной необыкновенной волны, которое при любом фиксированном продольном волновом числе должно определяться соотношением $(\omega_{pe}^2/\omega^2)_{SX} = (\omega + \omega_{ce})/(\omega + (\omega_{ce})_{OX})$, где ω_{pe} и ω_{ce} – плазменная и циклотронная частоты электронов, а $(\omega_{ce})_{OX}$ – значение циклотронной частоты в точке соприкосновения отсечек для обыкновенной и необыкновенной волн. Так как на рисунке $(\omega_{ce})_{OX} < \omega$, то по крайней мере при $\omega_{ce} > \omega$ должно выполняться неравенство $(\omega_{pe}^2/\omega^2)_{SX} > 1$, то есть контур отсечки необыкновенной волны должен находиться внутри контура отсечки обыкновенной волны. Поскольку рис. 2.2 не является результатом расчета, а представляет собой вспомогательную иллюстрацию, то данное несоответствие не влияет на остальной изложенный материал.

2. На стр. 157 в формуле разложения, ссылающейся на работу [105], допущена опечатка: в ее правой части пропущена зависимость от z . Тем не менее, все дальнейшие выкладки справедливы.

Данные замечания не влияют на общую положительную оценку работы, которая выполнена на высоком научном уровне и вносит существенный вклад в развитие теории линейной и нелинейной трансформации электромагнитных волн. Результаты диссертационного исследования отражены в 31 публикации в ведущих научных журналах и многократно докладывались на международных и российских научных конференциях по тематике работы.

Автореферат соответствует всем требованиям ВАК и отражает содержание диссертации и опубликованных работ автора.

Рецензируемая работа «Теория распространения и трансформации микроволновых пучков в неоднородной турбулентной плазме» соответствует требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением

Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Попов А.Ю., заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Отзыв составлен главным научным сотрудником отдела физики плазмы Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, д.ф.-м.н. профессором

Батановым Г.М.

и старшим научным сотрудником отдела физики плазмы, к.ф.-м.н.

Терещенко М.А.

Доклад А.Ю. Попова, отражающий основные результаты диссертации, был заслушан на научном семинаре отдела физики плазмы Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН 25 февраля 2016 г. Работа получила единогласную положительную оценку участников семинара.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании Ученого совета отдела физики плазмы, протокол № 428 от 10 марта 2016 г.

Председатель Ученого совета
отдела физики плазмы
к.ф.-м.н.

В.А. Иванов

Ученый секретарь Ученого совета

Н.Ф.Ларионова