

Отзыв

доктора физ.-мат. наук, профессора, заведующего лабораторией физики газового разряда Государственного научного учреждения «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» Леонида Васильевича Симончика (l.simonchik@ifanbel.basnet.by, +375 17 2841431, пр. Независимости 68, 220072 Минск, Беларусь) на автореферат диссертации Попова А.Ю. «Теория распространения и трансформации микроволновых пучков в неоднородной турбулентной плазме», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01-04-08 – физика плазмы в диссертационный совет Д 002.205.03

Основные методы дополнительного высокочастотного нагрева плазмы и генерации безиндукционного тока увлечения в современных токамаках связаны с диапазонами верхнегибридных и электронных циклотронных волн. Моделированию распространения этих волн в плазме токамака и посвящена диссертационная работа А.Ю. Попова. Этот факт и определяет актуальность темы диссертации. Математические сложности проблем распространении волн в плазме токамака обычно преодолеваются в современных теоретических исследованиях применением численного моделирования, эффективность которого сильно зависит от простоты и адекватности используемых моделей. Однако 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 и даже трехмерной неоднородности плазмы токамака/стелларатора, реального профиля невозмущенных параметров, эффектов дифракции и рефракции пучка и наличия в плазме низкочастотной турбулентности. Диссертация посвящена развитию адекватных реальному эксперименту теоретических моделей, которые описывают линейную и нелинейную трансформацию волновых пучков.

Подход диссертанта к решению электродинамических задач, рассмотренных в диссертации, позволил диссертанту решить широкий круг задач и получить новые результаты, краткое перечисление которых заключается в следующем. В развитых теоретических моделях найдены пороги перехода рефлектометрии из линейного режима рассеяния зондирующей волны, описываемого в борновском приближении, в сильно нелинейный режим рассеяния зондирующей волны «вперед» и «назад», установлена связь измеряемых характеристик и характерных времен и пространственных масштабов низкочастотной турбулентности. Предложены как методы реконструкции параметров и профилей флуктуаций плотности и их полоидальной скорости вращения из данных флуктуационной рефлектометрии, так и схема усиленного рассеяния в флуктуационной рефлектометрии.

Решена задача линейной трансформации нормальных мод в окрестности критической поверхности в трехмерно неоднородной плазме. Получена система дифференциальных уравнений, которая описывает электрические поля взаимодействующих волн, с учетом шира магнитного поля и кривизны магнитной силовой линии. Найдены интегральные выражения для амплитуд взаимодействующих полей, коэффициенты трансформации и отражения. Основные предсказания теоретической модели подтверждены сравнением с результатами полноволнового моделирования.

Получена замкнутая форма представления дисперсионного уравнения электронных бернштейнских волн с учетом слабых релятивистских эффектов. Показано, что в равновесной магнитной конфигурации с немонотонным радиальным профилем модуля магнитного поля, которая может реализовываться в токамаках с малым аспект-

ным соотношением, для электронных бернштейновских волн существует дополнительная область прозрачности между поверхностью верхнего гибридного резонанса и поверхностью гармоника электронного циклотронного резонанса. Получено дисперсионное уравнение, адекватно описывающее электронные бернштейновские волны в этой области.

Рассмотрены различные 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. Эти сценарии могут объяснить аномальное отражение волны накачки и аномальный нагрев ионов, наблюдавшиеся в экспериментах по электронному циклотронному нагреву плазмы в тороидальных ловушках.

Результаты теоретических исследований, полученные Поповым А.Ю. в диссертационной работе, вносят существенный вклад в понимание закономерностей их взаимодействия с плазмой, что позволяет оптимизировать и прогнозировать эффективность диагностики и нагрева плазмы. Полученные результаты широко представлены научной общественности в виде публикаций в рецензируемых физических журналах и в докладах на международных научных конференциях. В своих исследованиях Попов А.Ю. использовал большой арсенал различных теоретических методов, в том числе и своих оригинальных, всякий раз обосновывая их применение и получаемые с помощью их результаты, что не дает повода усомниться в достоверности полученных результатов.

Считаю, что диссертационная работа «Теория распространения и трансформации микроволновых пучков в неоднородной турбулентной плазме» выполнена на высоком научном уровне и, несомненно, удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Попов А.Ю. заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Заведующий лабораторией физики газового разряда
Института физики НАН Беларуси,
доктор физ.-мат. наук, профессор

Л.В. Симончик

4 марта 2016 г.