

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Склярова Владислава Фатыховича на тему: «Исследование эмиссии субмиллиметровых электромагнитных волн из плазмы при коллективной релаксации электронного пучка в многопробочной ловушке ГОЛ-3» представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Исследование генерации электромагнитного излучения в плазме с сильно-анизотропной функцией распределения электронов по скоростям является важной задачей современной физики плазмы. Такие исследования важны для правильного построения физических моделей, описывающих процессы в солнечной короне и при решении задач управляемого термоядерного синтеза. Наличие сильно-анизотропной функции распределения частиц плазмы по скоростям обычно связано с существованием в плазме отдельного коллектива частиц с большой энергией. Это соответствует, например, инжекции электронов в плазму. Так, для решения задач термоядерного синтеза предполагается использование электронных пучков для нагрева плазмы до необходимых температур. Более того, инжекция электронных пучков в плазму может быть использована для управления некоторыми видами неустойчивостей, в частности, для стабилизации винтовой неустойчивости. Тема диссертационной работы, безусловно, **актуальна**.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, приложения. Работа выполнена на 151 листе и содержит 75 рисунков и 1 таблицу. Библиографический список включает в себя 247 наименований.

В первой главе проведён обзор литературы, посвященной основным физическим процессам, протекающим в плазме, которые могут приводить к генерации электромагнитного излучения вблизи плазменной частоты. Основное внимание уделено процессам нелинейного взаимодействия плазменных волн с образованием электромагнитной волны.

Во второй главе описывается экспериментальная установка ГОЛ-3, на которой были проведены эксперименты по генерации электромагнитного излучения в плазме во время интенсивной релаксации электронных пучков. Также в этой главе приводятся основные параметры плазмы. Плотность плазмы регистрировалась при помощи двух независимых систем: для определения динамики средней плотности плазмы использовался интерферометр Майкельсона, а для регистрации локального профиля плотности плазмы – томсоновское рассеяние лазерного излучения. Для измерения ухода быстрых электронов пучка на элементы конструкции установки, в нескольких точках по длине установки, измерялся уровень жёсткого рентгеновского излучения. Число надтепловых электронов плазмы определялось по величине мягкого рентгеновского излучения. Также использовался набор диамагнитных зондов, расположенных вдоль оси системы. Регистрация тока инжектируемого электронного пучка проводилась при помощи пояса Роговского, установленного перед входной катушкой ведущего магнитного поля в основной соленоид, а напряжение в ускоряющем зазоре (энергия электронов) – с помощью резистивного делителя.

В третьей главе описан комплекс радиометрических диагностик, при помощи которого были проведены измерения спектральной плотности мощности излучения в диапазоне частот, включающем в себя ленгмюровскую частоту, верхнегибридную частоту, а также их

удвоенные значения. В состав радиометрического комплекса входят 8-канальный полихроматор, позволяющий определить спектр анализируемого излучения в диапазоне частот от 100 до 550 ГГц; двухканальный поляриметр, дающий возможность проследить изменение двух взаимно-ортогональных компонент поляризации излучения; набор одиночных детекторов, позволяющих проводить обзорную (в широком диапазоне частот) регистрацию мощности эмиссии в разных точках по длине установки; а также широкополосный (от 50 ГГц до 3 ТГц) калориметр. В качестве детектирующего элемента во всех диагностиках (за исключением калориметра) используются диоды с барьером Шоттки, с временным разрешением лучше 2 нс. Для разделения исходного потока излучения на несколько вторичных в полихроматоре и поляриметре используются сеточные поляризаторы. Спектральное разделение каналов регистрации осуществляется за счёт установки перед детекторами квазиоптических сеточных фильтров на основе частотно-избирательных поверхностей с изотропной топологией. Также в главе описана методика абсолютной калибровки диагностической аппаратуры.

Четвёртая глава посвящена методике обработки экспериментальных данных, которая включает в себя устранение ложных срабатываний детектирующей аппаратуры, а также восстановление распределения спектральной плотности излучения по измерениям в нескольких независимых спектральных диапазонах детекторами с известной аппаратной функцией. Восстановление спектра производится путём решения обратной задачи на поиск ядра системы уравнений Фредгольма I-го рода. Для решения данной задачи искомая функция разлагается по базисным функциям, в качестве которых выступает последовательность из «ступенек» Хевисайда. Ключевым отличием от итерационного метода, предложенного Танабой и Хуангом, состоит в том, что размер «ступенек» Хевисайда не является фиксированным внешним параметром, а определяется исходя из минимизации функционала отклонения численно получаемой функции от экспериментально измеренной величины, таким образом, метод становится авторегуляризирующим.

В пятой главе приводится описание экспериментов по наблюдению эмиссии электромагнитного излучения из плазмы во время коллективной релаксации электронного пучка. Отдельно рассматриваются эксперименты по релаксации релятивистского и субрелятивистского электронных пучков. В экспериментах с релятивистским пучком, экспериментально было установлено, что эмиссия электромагнитного излучения из плазмы происходит на стадии интенсивного нагрева плазмы. Излучение наблюдалось в частотном диапазоне вблизи верхнегибридной частоты, при этом излучение имеет поляризацию преимущественно вдоль магнитного поля, а также её удвоенного значения. Наиболее вероятными механизмами генерации излучения являются: для излучения на первой гармонике – рассеяние плазменных волн на флуктуациях плотности плазмы (например, на ионно-звуковых волнах), а для генерации на удвоенной частоте – слияние двух плазменных волн в электромагнитную волну.

При увеличении магнитного поля происходило увеличение мощности эмиссии излучения. На основании того, что временная структура эмиссии излучения представляет собой последовательность кратковременных всплесков излучения длительностью $(2 \div 5)$ нс, происходящих в основном на стадии интенсивного нагрева плазмы, а источником электромагнитного излучения является область, занятая электронным пучком в плазме, выдвигается гипотеза, что излучение в плазме образуется в локальных областях с пониженной плотностью. Во время релаксации электронного пучка одновременно с раскачкой плазменных волн в плазме возникает пространственная модуляция плотности (за счёт модуляционной неустойчивости). Области с изначально пониженной плотностью

выступают в роли «потенциальных ям» для накопления коротковолновых плазменных волн, которые приводят к увеличению электрического поля внутри ямы, и, как следствие, углублению ямы. В экспериментах по инъекции слабoreлятивистского электронного пучка в плазму также наблюдалась интенсивная генерация электромагнитного излучения вблизи первой гармоники верхнегибридной частоты, а также в полосе несколько ниже второй гармоники. Объяснить такое поведение спектра излучения только на основе процессов рассеяния плазменных волн на флуктуациях плотности и слиянии двух плазменных волн в электромагнитную волну кажется весьма затруднительным.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

В диссертационной работе получен ряд важных результатов, отметим ключевые из них:

1. В экспериментах по релаксации релятивистского электронного пучка в плотной плазме, удерживаемой во внешнем магнитном поле экспериментально установлено наличие эмиссии электромагнитного излучения в диапазоне от 50 до 550 ГГц. В спектре излучения имеется два выделенных локальных максимума: в окрестности верхнегибридной частоты и её удвоенного значения. Источником излучения является область в плазме, занятая электронным пучком; генерация излучения происходит на стадии интенсивного нагрева плазмы, причём чем выше темп нагрева плазмы, тем больше регистрируемая мощность излучения. Временная структура эмиссии излучения представляет собой последовательность кратковременных ($2 \div 5$ нс) всплесков излучения.
2. В экспериментах по релаксации слабoreлятивистского электронного пучка в плазме, удерживаемой во внешнем магнитном поле установлено наличие эмиссии электромагнитного излучения вблизи верхнегибридной частоты и её удвоенного значения. В определенных условиях относительная часть мощности электронного пучка, теряемая на излучение электромагнитных волн, имеет значение $\sim 4\%$.

Диссертация не свободна от недостатков. Ниже приводятся некоторые из них.

Замечания.

- 1 В тексте диссертации встречаются синтаксические и стилистические ошибки, есть не вполне верное использование терминов. Например, «продольно поляризованным» излучением автор называет излучение с вектором электрического поля параллельным постоянному магнитному полю ловушки. Вызывает неоднозначное толкование и термин «степень поляризации».
- 2 В работе мало внимания уделено описанию генератора плазмы и параметрам плазмы, заполняющей магнитную ловушку. Более подробное описание параметров основного плазменного компонента позволило бы составить лучшее представление о процессах в плазме.
3. Распределение электронов по энергиям в пучке может оказывать влияние на генерацию излучения в плазме. В диссертации этому не уделено достаточного внимания.
4. Измерение профиля концентрации плазмы проводится по томсоновскому рассеянию лазерного излучения, при этом используется достаточно мощный лазер. При энергии в импульсе лазерного излучения 20 Дж возможно влияние лазерного поля на параметры измеряемой плазмы. В работе нет комментариев по этому поводу.

Отмеченные замечания не снижают важности и достоверности полученных в диссертации результатов.

Новизна представленных в диссертации результатов не вызывает сомнений, все полученные в диссертации результаты являются оригинальными. Результаты диссертационной работы могут использоваться в исследовательских, проектных и конструкторских организациях, работающих в области физики плазмы (ИПФ РАН, ИРЭ РАН, ИОФ РАН, ФТИ РАН, НИЦ «Курчатовский институт», МГУ, МФТИ, и др.).

Результаты диссертации докладывались на многочисленных российских и международных конференциях и представлены в 15 реферируемых изданиях (в том числе и в журналах из перечня ВАК РФ).

Результаты работы были доложены на заседании объединенного семинара по физике плазмы в ИПФРАН 25 сентября 2017 г. и получили поддержку участников семинара.

Диссертация Склярова В.Ф. наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение проблем эмиссии субмиллиметровых электромагнитных волн из плазмы при релаксации электронного пучка в многопробочной магнитной ловушке, имеющих существенное значение для физики плазмы. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, изложенным в п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.).

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 01.04.08- «Физика плазмы» в части физико-математических наук, а автор диссертационной работы, Скляров В.Ф., заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

Официальный оппонент

зав. лабораторией прикладной физики плазмы,
доктор физико-математических наук



А. В. Водопьянов

Сведения об официальном оппоненте:

Водопьянов Александр Валентинович, доктор физико-математических наук, 01.04.08 физика плазмы, адрес: 603950, г. Нижний Новгород. БОКС - 120, ул. Ульянова, 46., адрес электронной почты: avod@yandex.ru, наименование организации: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», должность: заведующий лабораторией прикладной физики плазмы.

Подпись д.ф.-м.н. А. В. Водопьянова заверяю.

Ученый секретарь ИПФ РАН

кандидат физико-математических наук



И.С. Корюкин

30 ноября 2017