

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации СКЛЯРОВА Владислава Фатыховича «Исследование эмиссии субмиллиметровых электромагнитных волн из плазмы при коллективной релаксации электронного пучка в многочленной ловушке ГОЛ-3», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — физика плазмы

Актуальность

Интенсивность, спектральный состав и поляризация электромагнитного излучения зависят от параметров плазмы, поэтому служат средством диагностики. Излучение играет важную роль в балансе энергии, поэтому помогает понять механизмы установления термодинамического равновесия. Излучение космической плазмы является одним из главных каналов получения астрофизических данных, в частности, по солнечным вспышкам. Все это доказывает актуальность темы исследования как для физики термоядерной плазмы, так и для космических исследований.

Обоснованность положений и степень достоверности научных результатов

Обоснованность научных положений не вызывает сомнений, поскольку данные получены на калиброванной установке с использованием проверенных методик и обработаны адекватными численными методами. Достоверность результатов основана в первую очередь на современной комплексной системе измерений. Создан абсолютно калируемый комплекс радиометрических диагностик для регистрации электромагнитного излучения в интервале 50–550 ГГц. Достоверность основных результатов подтверждается согласием с теоретическими расчетами и измерениями, выполненными другими приборами: детекторами рентгеновского излучения, нейтронного потока, диамагнетизма плазмы.

Новизна

В опытах по нагреву плотной плазмы релятивистским электронным пучком установлено, что

1. В спектре имеется два пика: на верхнегибридной частоте и её второй гармонике.
2. Излучение генерируется в области электронного пучка, причём чем выше темп нагрева плазмы, тем больше мощность излучения.
3. Излучение на верхнегибридной частоте является преимущественно продольно-поляризованным, а на удвоенной частоте — попечечно-поляризованным.

Научная новизна подтверждается 15 статьями в журналах *Fusion Science and Technology*, *Terahertz Science and Technology*, *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, *Phys. Plasmas*, *Физика плазмы*, *Приборы и техника эксперимента*, а также докладами на отечественных и международных конференциях.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные экспериментальные данные и созданное в процессе работы экспериментальное оборудование могут быть использованы в дальнейших экспериментах по релаксации релятивистского электронного пучка в магнитном поле и для проверки теорий ленгмюровской турбулентности, которая возбуждается при взаимодействии пучка с плазмой. Результаты будут также полезны в технике мощных генераторов излучения на основе пучково-плазменного взаимодействия.

Содержание

Диссертация состоит из Введения, 5 глав и Заключения, содержит 151 страницы текста, 75 рисунков и 247 ссылок на литературу. Структура работы может служить образцом для других диссертаций: обзор литературы по теме, описание экспериментальной установки, детекторы субмиллиметрового излучения, созданные автором, алгоритмы

обработки данных, экспериментальные результаты и их качественная интерпретация.

Введение описывает актуальность измерения параметров электромагнитного излучения для диагностики как лабораторной, так и космической плазмы. Перечислены известные механизмы генерации излучения на плазменной частоте и ее второй гармонике. Приведено содержание диссертации по главам и основные результаты экспериментов. Сформулирована цель работы — развитие диагностики коллективного взаимодействия электронного пучка с плазмой методами субмиллиметровой радиометрии.

Глава 1 посвящена литературному обзору современного состояния теории электромагнитного излучения из плазмы. Подробно обсуждаются механизмы генерации на первой и второй гармонике плазменной частоты, изменение спектра и поляризации в магнитном поле. Приведены формулы для циклотронного излучения и мазерного усиления в неравновесной плазме.

В главе 2 описана экспериментальная установка ГОЛ-3 в режимах однородного и гофрированного магнитного поля. Отдельные разделы посвящены инжекции релятивистского электронного пучка, а также диагностики плотности, измерению диамагнетизма, регистрации рентгеновского излучения и нейтронных потоков.

В главе 3 представлен диагностический комплекс, регистрирующий излучение из плазмы. Подробно описана многоканальная радиометрия в субмиллиметровом диапазоне, которая позволяет измерять спектральную плотность мощности на плазменной, верхне-гибридной частоте и на второй гармонике верхне-гибридной частоты. Приведены характеристики 4- и 8-канального полихроматоров, а также двухканального поляриметра. Разъясняется методика юстировки квазиоптических элементов и абсолютной калибровки всего комплекса. В разделе 3.7 описана быстродействующая система оцифровки и записи сигналов.

Глава 4 посвящена обработке данных. В процессе предварительной обработки с помощью реперных измерений, полученных в условиях полного отсутствия полезных сигналов, производилось вычита-

ние смещения нуля и артефактных всплесков. Скорректированный сигнал служил для восстановления спектра методом решения обратной задачи для интегрального уравнения. Спектр надо было восстановить по измерениям в нескольких спектральных полосах детекторами с известной из независимых измерений аппаратной функцией. Неизвестная функция считается кусочно-постоянной, а высота ступеней подбиралась по минимуму невязки. Такой подход обычно называется параметрической регуляризацией. Тестировался также приближенный, но быстрый метод решения обратной задачи на основе теоремы о среднем, который хорошо работает, когда аппаратные функции детекторов не перекрываются.

В главе 5 приведены результаты обработки, в том числе в опытах по релаксации слаборелятивистского пучка. Демонстрируется синее смещение спектра при увеличении плотности плазмы. По мере увеличения магнитного поля мощность излучения тоже возрастала, вероятно, из-за роста инкремента неустойчивости. Особое внимание удалено зависимости от магнитного поля, режиму тонкого электронного пучка, определению области источника, поляризации излучения и его зависимости от времени. Показано, что максимальная мощность эмиссии наблюдается в области наиболее интенсивного взаимодействия пучка с плазмой. Установлено также, что выходящее излучение представляет собой последовательность кратковременных всплесков длительностью несколько наносекунд. В Заключении перечислены результаты работы.

Замечания

По диссертации имеются следующие замечания:

1. Уравнение Фредгольма второго рода (4.1) в общем случае не нуждается в регуляризации. Надо было разъяснить, зачем в обработке данных понадобилась параметрическая регуляризация.
2. Во Введение включена литература по электромагнитному излучению солнечных вспышек разных типов. Стоило бы для целности и последовательности изложения в Заключении кратко рас-

сказать, как новые методы регистрации субмиллиметрового излучения и обработки данных могли бы помочь в астрофизике.

3. В библиографии последние 10 страниц заполнены подробными ссылками на тезисы многочисленных докладов конференций. Это отклонение от традиций: обычно конференции перечисляются во Введении в разделе «апробация».
4. В работе встречаются неопределенные единицы, например, «ед.» в подписи к оси рис. 3.3 (стр.41); термины, например, «изначальные условия» (стр.64); опечатки в формулах, например $s \in \mathbb{Q}_+$ (стр.74).

Приведенные замечания носят частный характер, относятся к отбору материала и оформлению рукописи, а не к содержанию диссертации, и поэтому не влияют на общую положительную оценку работы.

Выводы

Оценивая работу в целом, можно сделать вывод, что диссертационная работа В.Ф. Склярова представляет собой научно-квалификационную работу, в которой экспериментально исследовано коллективное взаимодействие релятивистского электронного пучка с плазмой методами субмиллиметровой радиометрии. Решенная задача имеет существенное значение для физики турбулентного нагрева термоядерной плазмы. Работа хорошо структурирована и написана на высоком научном уровне. Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных журналах и известны специалистам. Автореферат правильно отражает основные идеи и выводы диссертации.

Учитывая актуальность темы, научную новизну результатов, достоверность и обоснованность выводов, теоретическую и практическую значимость защищаемых положений можно заключить, что работа В.Ф. Склярова определенно удовлетворяет всем требованиям п. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденных постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук,

а автор заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — «Физика плазмы».

07.11.2017

Доктор физ.-мат.наук, профессор

Шапиро Д.А. Шапиро

Заведующий лабораторией фотоники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН

Проспект академика Коптюга, д. 1, 630090, Новосибирск,
ИАиЭ СО РАН, тел. 3309021, e-mail: shapiro@iae.nsk.su

Подпись д.ф.-м.н. Д.А.Шапиро *з а в е р я ю:*

Ученый секретарь ИАиЭ СО РАН

Д.Т.Н.

Корольков

В.П. Корольков

