

ОТЗЫВ

Члена диссертационного совета Кузнецова Виктора Иосифовича на диссертацию Кубаджи Хенд на тему «Исследование низковольтного пучкового разряда в инертных газах при числах Кнудсена порядка 1», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Актуальность темы диссертации.

В последние годы разные страны (Россия, США, Китай и др.) все большее и большее внимание начинают уделять развитию энергетики большой мощности как для ближнего Космоса, так и для поверхности Луны и других планет. Источником тепла здесь может служить только ядерный реактор. Однако для преобразования тепла в электричество необходимо, чтобы преобразователь имел небольшие массо-габариты. А для этого он должен обладать высокими плотностью мощности, КПД и температурой холодильника=излучателя. В настоящее на роль такого преобразователя может претендовать только термоэмиссионный преобразователь (ТЭП), работающий в кнудсеновском режиме и имеющий высокую температуру эмиттера. Под стать самому ТЭП должна быть и вся управляющая энергосистемой электроника – это может быть только плазменная электроника. Наиболее подходящие для указанных целей приборы основаны на использовании низковольтного пучкового разряда в инертных газах (НПР). Такие плазменные системы активно изучаются в настоящее время. Тем не менее, остается нерешенным ряд физических проблем, решение которых необходимо для выполнения оптимизации работы упомянутых приборов плазменной электроники. К таким проблемам относятся следующие задачи, решаемые в представленной диссертации:

- экспериментально исследовать условия возникновения бесстолкновительной релаксации пучка электронов в НПР путем изучения пространственной динамики ФРЭ,
- создать физическую модель и разработать кинетическую квазилинейную теорию устойчивости НПР для случая взаимодействия электронного пучка с плазмой, имеющей неизотропную функцию распределения электронов по скоростям (ФРЭ),
- создать физическую модель и разработать кинетическую квазилинейную теорию устойчивости НПР с учетом неоднородности концентрации плазмы и ослабления пучка вследствие электрон–атомных столкновений,
- создать кинетическую квазилинейную теорию устойчивости НПР с учетом произвольной неизотропной индикаторы упругого рассеяния электрона на атоме.

Таким образом, тема диссертации и решаемые ее автором задачи, безусловно, актуальны.

Содержание диссертации.

Во **Введении** отражена актуальность темы диссертации, сформулированы ее цели и задачи; сформулированы защищаемые положения, а также новизна и ценность полученных результатов.

В **первой главе** представлен обзор работ по теме диссертации. Он состоит из двух частей. В первой части проанализированы основные исследования, связанные с

разработкой и развитием зондового метода диагностики анизотропной плазмы. Подробно обсуждается его применение для исследований плазмы с различной степенью анизотропии и типом симметрии. Во второй части дается обзор публикаций, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям плазмы НПР в различных режимах с акцентом на явлении пучково-плазменной неустойчивости. Отмечается, что таких работ немного, а имеющиеся теоретические исследования часто затрудняют возможность адекватной интерпретации современных экспериментальных результатов.

Во **второй главе** представлено описание экспериментальной установки, прибора и зондового метода диагностики плазмы. Рассмотрены метод получения второй производной зондового тока и способы учета погрешностей в экспериментальных измерениях, возникающих при его применении. Изложены результаты зондовых исследований релаксации быстрой части ФРЭ в плазме гелиевого НПР в режиме, когда число Кнудсена имеет величину порядка 1. Подтвержден и обоснован пороговый критерий возбуждения пучково-плазменной неустойчивости.

В **третьей главе** развита кинетическая теория устойчивости для диода, в котором происходит взаимодействие электронного пучка с плазмой, с учетом столкновительных членов, соответствующих как упругим, так и неупругим рассеяниям электронов на атомах. Обосновывается физическая модель, учитывающая анизотропию ФРЭ и неоднородность плазмы. Выводится дисперсионное уравнение и дается его аналитическое решение. Теоретические результаты сравниваются с собственными экспериментальными данными, а также с данными экспериментов других авторов.

В **Заключении** перечислены основные результаты проведенного исследования.

Диссертационная работа оставляет очень приятное впечатление. Поставленная цель достигнута, решены основные задачи, впервые получены важные экспериментальные и теоретические результаты о структуре НПР, диапазоне его устойчивых состояний, ФРЭ и т.д. Результаты вносят существенный вклад в понимание физики пучковых разрядов и позволяют провести оптимизацию приборов плазменной электроники, основанных на НПР.

Хочется отметить ряд удачных экспериментальных методов, примененных соискателем при определении сильно неизотропной ФРЭ. В работе использованы последние достижения в области зондовой методики с применением плоского одностороннего зонда. В своих теоретических исследованиях соискатель применил ряд оригинальных математических методов (разложение в расходящиеся асимптотические ряды, теорию функции комплексной переменной, решение интегральных уравнений и др.), что позволило получить решение сложных физических задач аналитически. Это позволило проанализировать полученные результаты с точки зрения их соответствия более простым моделям других авторов, асимптотического поведения решений и т.д., и, таким образом, провести верификацию разработанной кинетической теории.

Замечания к содержанию и оформлению диссертации.

Представленная работа не лишена некоторых недостатков. Есть замечания, как по существу содержания, так и по оформлению работы:

1. На стр. 32 в формуле (12) впервые встречается обозначение R_j , при этом отсутствует его определение.

2. На этой же странице во второй строчке снизу присутствует численный коэффициент, при этом не указан даже порядок его величины.
3. На стр. 55 в верхней строчке введено обозначение τ_i , которое не удалось обнаружить в последующем тексте диссертации.
4. На стр. 81 разные величины в формулах (124) и (127) определены одним обозначением $\Phi_{0g}(x)$.
5. На стр. 87 во втором абзаце снизу утверждается, что в рассматриваемых условиях в НПР чаще реализуются условия решения задачи на неустойчивость с граничными условиями, а не с начальными. Учитывая, что задача с начальными условиями возникает в данном случае из-за шумов плазмы, это утверждение не очевидно и требует объяснения.

Однако, сделанные замечания не снижают высокого уровня и ценности полученных соискателем результатов.

Диссертация Кубаджи Хенд на тему: «Исследование низковольтного пучкового разряда в инертных газах при числах Кнудсена порядка 1» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а соискатель Кубаджи Хенд заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук,
старший научный сотрудник,
зам. руководителя отделения Физики Плазмы,
Атомной Физики и Астрофизики
ФГУН ФТИ им. А.Ф. Иоффе

02.05.2023

Кузнецов В.И.