

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Солихова Давлата Куватовича на
диссертацию
Хенд Кубаджи

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».

Диссертационная работа Кубаджи Хенд посвящена исследованию низковольтных пучковых разрядов (НПР) в инертных газах, которые могут использоваться в качестве рабочей среды различных плазменных электронных приборов. Плазма НПР обладает набором уникальных свойств, позволяющих создавать на ее основе приборы плазменной энергетики нового поколения: стабилизаторы тока и напряжения, инверторы, мощные генераторы электромагнитного излучения, управляемые сеточные ключевые элементы для токов высокой плотности и др. Эти приборы способны работать в сложных условиях эксплуатации, включая высокие температуры и уровни радиации.

Приборы плазменной электроники на основе НПР имеют свои достоинства и недостатки. В числе последних одним из основных является возбуждение неустойчивостей и колебаний различной природы. Ярким примером этого является пучково-плазменная неустойчивость, возникающая в плазме НПР при превышении критического значения плотности разрядного тока, приводящая к полной энергетической релаксации электронных пучков. Преодоление этой проблемы требует решения целого ряда вопросов, которые включают в себя как проведение экспериментальных исследований, так и создание теоретических моделей низковольтного пучкового разряда, которые, без сомнений, должны быть основаны на кинетическом подходе. При этом экспериментальные исследования должны позволять проводить измерения сильно анизотропной функции распределения электронов по скоростям. В научной группе профессора А.С.Мустафаева разработаны и успешно применяются зондовые методы измерения пространственного распределения параметров такой сложной и предельно неравновесной среды как плазма НПР инертных газов. Использование этих методов в сочетании с теоретическими исследованиями устойчивости системы (быстрый пучок - плазма) в различных режимах НПР является, несомненно, своевременной и **актуальной задачей**, позволяющей надеяться на успешное решение.

Цель работы - проведение экспериментальных и теоретических исследований для построения физической модели и аналитических методов расчета параметров устойчивости НПР, основанных на кинетическом подходе, с учетом всех особенностей формирования функции распределения электронов для оптимизации параметров пучковых разрядов.

В диссертации получен целый ряд новых и важных результатов. Впервые разработана кинетическая теория взаимодействия электронного пучка с плазмой, которая учитывает анизотропию функции распределения электронов, неоднородность плазмы и упругие и неупругие столкновения электронов с атомами. Созданная теория позволяет определять параметры плазмы, при которых возникают неустойчивости и обосновать их возникновение. Разработанные

физические модели и расчетные методы подтверждены экспериментально путем непосредственных измерений зондовыми методами неравновесной сильно анизотропной функции распределения электронов по скоростям. Полученные теоретические результаты хорошо согласуются с данными других авторов. Развита линейная кинетическая столкновительная теория взаимодействия электронного пучка с плазмой с целью определения условий появления неустойчивостей. Найдено аналитическое решение для дисперсионного уравнения, что дает возможность управлять низковольтным пучковым разрядом в зависимости от параметров плазмы. При разработке теории учтены основные особенности функции распределения электронов: ее анизотропия; неоднородность плотности плазмы; упругие и неупругие столкновения электронов с атомами с учетом произвольной индикатрисы упругого рассеяния электрона на атоме плазмообразующего газа.

Характеризуя диссертационную работу в целом можно отметить, что она производит прекрасное впечатление. Прежде всего, хотелось бы отметить тщательное описание экспериментальной установки и использованных методик для измерения сильно анизотропной функции распределения электронов по скоростям. Эта задача весьма нетривиальная, и поэтому описание всех наиболее важных факторов, влияющих на точность измерений (аппаратные искажения, влияние ионного тока и сопротивлений в зондовой цепи, влияние размеров зонда, чистоты его поверхности, воздействие на измерения колебаний в плазме, калибровка схемы), выглядит важной и уместной. Сильное впечатление производит теоретическая часть работы, которая наглядно показывает важность кинетического подхода. Возможно, она выглядит даже несколько перегруженной математическими выкладками, но здесь последнее слово принадлежит автору диссертации.

Несмотря на безусловные достоинства диссертационной работы, есть несколько замечаний и вопросов.

1. Изложение материала диссертации вызывает такой вопрос: в гл. 2 приведены результаты экспериментальных измерений характеристик разряда, которые сравниваются с результатами расчетов по теории, изложенной в последующих главах. Не логичнее было бы сначала изложить теоретическое описание исследуемого разряда, а потом результаты эксперимента и сравнение с теорией?
2. В диссертации разработана кинетическая линейная теория. Возможно ли решение более общей задачи и что это может дать по сравнению с линейной теорией?
3. На стр. 26 и Рис. 5 приведено описание и иллюстрация калибровки измерительной схемы. Не вполне понятен выбор тарировочного сигнала, в котором наряду со стопроцентно модулированным дифференцирующим сигналом присутствует изменяемая амплитуда с дополнительной частотой ω_3 ?
4. На мой взгляд, требует дополнительного обоснования учет влияния возможных колебаний в плазме на результаты измерений. Использованный способ проведения измерения при выключенном дифференцирующем сигнале неочевиден.
5. В работе отсутствует формулировка выводов. В Заключении приведены основные результаты, но они сформулированы довольно пространно.

Сделанные замечания ни в коей мере не умаляют достоинства диссертанта и диссертации, полученные результаты свидетельствуют о высоком уровне проведенных исследований и полученных результатов, их достоверности и важности.

Диссертация Хенд Кубаджи 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», соискатель **Хенд Кубаджи** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. «Физика плазмы». Пункт 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Член диссертационного совета,
доктор физико - математических наук,
профессор кафедры теоретической физики
физического факультета
Таджикского национального университета

Д.К. Солихов

Подпись профессора Д.К. Солихов потверждают
Начальник Управления кадров и спецчасти ТНУ

Э.Ш. Тавкиев



25. 04. 28