

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИСЭ СО РАН,
член-корреспондент РАН



 Н.А. Ратахин
«10» марта 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Чернышева Тимофея Владимировича «Экспериментальные и численные исследования нарушения стационарности горения интенсивных разрядов с замкнутым дрейфом электронов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Актуальность для науки и практики

Разряд с замкнутым дрейфом электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях, приоритет в исследованиях которого принадлежит российским учёным, достаточно широко используется в электрореактивных двигателях (стационарных плазменных двигателях), в технологических источниках низкоэнергетических ионов, например, ускорителях с анодным слоем, которые предназначены для очистки и активации поверхности при её модификации и других применениях. Однако, несмотря на достаточно долгую историю исследования этого разряда и значительные научно-технические достижения существует ряд вопросов и задач, от решения которых зависит дальнейшее развитие и практическое применение устройств с замкнутым дрейфом электронов. Например, ускорители с анодным слоем неустойчивы к возбуждению высокочастотных градиентно-дрейфовых азимутальных волн, которые могут приводить к бесстолкновительному выносу электронов на анод и снижению КПД таких ускорителей. Поэтому экспериментальное исследование медленных нестационарных процессов горения разряда, определение условий, в которых происходит наиболее сильная модуляция токов, их математическое моделирование и определение условий существования стабильной формы разряда представляется актуальной задачей, решение которой позволит создавать новые электрофизические устройства с уникальными параметрами и расширить сферу их применений.

Основные научные результаты и их значимость для науки

Основные научные результаты, полученные автором:

1. Экспериментально исследован процесс зажигания разряда в ускорителе с анодным слоем. Установлено, что в момент зажигания разряда анодный ток может на порядок превышать значения характерные для установившегося режима. Показано, что величина «выброса» анодного тока зависит от тока эмиссии с катода компенсатора.

2. Показано, что при фиксированном расходе рабочего газа и различных комбинациях разрядного напряжения и индукции магнитного поля разряд горит в одном из двух режимов: «ускорительном» или «турбулентном». Экспериментально исследована область существования ускорительного режима в зависимости от величины магнитного поля и разрядного напряжения при различных расходах газа. Показано, что при постоянном напряжении с увеличением магнитного поля анодный ток уменьшается, и возникают сильные низкочастотные ионизационные колебания. При большем увеличении магнитного поля разряд переходит в метастабильное состояние, при котором разряд через ограниченные промежутки времени хаотически переключается в режим с резким увеличением тока.

3. Впервые в ускорителях с анодным слоем проведено бесконтактное измерение переменной составляющей азимутального тока. Показано, что низкочастотные колебания анодного тока сопровождаются колебаниями азимутального тока, причём максимум анодного тока сопровождается резким минимумом сигнала азимутального тока.

4. Построена кинетическая, нестационарная, численная модель газового разряда в скрещённых полях с неявной схемой решения уравнений движения в одномерном по координатам и трёхмерном по скоростям приближении. При этом учтён эффект размагничивания плазмы собственным магнитным полем замкнутого азимутального тока в нестационарной постановке.

5. С помощью численного моделирования показано, что в процессе зажигания разряда и перехода его в установившийся режим, определяющую роль играет размагничивание плазмы собственным полем азимутального тока.

6. Показано, что в области малых магнитных полей разряд неустойчив к спонтанному увеличению азимутального тока и сильному размагничиванию. Это приводит к резкому возрастанию частоты ионизации и переходу разряда в импульсный режим. В области больших магнитных полей разряд неустойчив к накоплению избыточного отрицательного пространственного заряда, что приводит к ионизационным колебаниям.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 106 страниц, включая 59 рисунков и 3 таблицы. Список цитируемой литературы включает 108 наименований.

Глава 1 носит обзорный характер и объединена с введением. В ней сформулированы актуальность исследований, цели и задачи работы, научная новизна и практическая ценность результатов, приведены основные

положения, выносимые на защиту. Рассмотрены основные особенности ионных источников с замкнутым дрейфом электронов (двигателей с протяженной зоной ускорения, ускорителей с анодным слоем, гибридных устройств). Дан обзор последних экспериментальных и теоретических достижений в этой области.

Глава 2 посвящена экспериментальным исследованиям нестационарных процессов в ускорителях с анодным слоем. Приведено описание макета ускорителя, экспериментальной установки и методики измерений. Приведены результаты исследований переходного процесса в момент зажигания разряда и выхода разряда в установившийся режим горения. Обнаружено, что анодный ток разряда в момент зажигания в 10–20 раз превышает значения, характерные для стационарного режима. С помощью серии вольт-амперных, магнит-амперных и магнит-тяговых характеристик определены условия горения разряда в «ускорительном» (со стабильными автоколебаниями) и «турбулентном» (с периодическими увеличениями тока разряда и тока с катода) режимах. Приведены результаты исследования низкочастотных колебаний азимутального тока, измеренных индуктивным методом.

Глава 3 посвящена моделированию низкочастотных процессов в разряде со скрещенными электрическим и магнитным полями. В ней описана методика решения нестационарных кинетических уравнений Власова-Больцмана методом крупных частиц в приближении электромагнитостатики.

Глава 4 включает в себя результаты одномерного (одна координата, три скорости) моделирования разряда. При расчёте процесса зажигания разряда показано, что первоначальное увеличение анодного тока обеспечивается двумя механизмами: быстрой ионизацией плотного газа и практически полным размагничиванием плазмы собственным магнитным полем азимутального тока. Расчёт показал появление характерных низкочастотных колебаний в условиях, когда размер разрядного промежутка и величина магнитного поля несогласованы. Предложена конфигурация магнитопровода с размагничивающими катушками, в которой внешнее магнитное поле быстро спадает за срезом разрядного канала и электроны свободно поступают в ускорительный слой.

В заключении изложены основные результаты работы. Список цитируемой литературы содержит обширную и вполне достаточную библиографию по всем вопросам, рассмотренным в диссертации.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при разработке более эффективных электрореактивных двигателей и технологических источников ионов. Результаты исследований могут быть рекомендованы к использованию в Исследовательском центре имени М.В.

Келдыша, Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете), Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана, Московском физико-техническом институте (государственном университете), Национальном исследовательском Томском политехническом университете, Всероссийском электротехническом институте имени В.И. Ленина и других организациях.

Общие замечания по диссертации

По работе могут быть сделаны следующие замечания:

1. Анализ осциллограмм, представленных на рис. 2.5, 2.6 и 2.8 затрудняется тем, что не указана шкала по оси времени, а приведены лишь численные значения, соответствующие моменту зажигания разряда. Поэтому невозможно оценить временные характеристики возникающих при горении разряда модуляций тока, хотя эти модуляции существенны.

2. Автор не приводит экспериментальных данных по прямому измерению импульсного изменения давления в межэлектродном промежутке разряда при его зажигании (да и сделать такие измерения чрезвычайно сложно). Однако в выводах по разделу 2.2 на стр. 40 однозначно, но бездоказательно, указано, что «выброс» тока в момент зажигания разряда обусловлен повышенной концентрацией атомов в зоне ионизации (по сравнению с рабочим режимом) и их быстрым выгоранием.

3. В главе 4 представлена предложенная автором конфигурация магнитопровода с размагничивающими катушками, в которой внешнее магнитное поле быстро спадает за срезом разрядного канала, и расчёт стационарного режима в этой конфигурации. Из диссертации не ясно была ли эта конфигурация реализована на практике и проводилось ли сравнение экспериментальных данных с расчетными.

Отмеченные недостатки не носят принципиального характера и не снижает ценности работы в целом.

Основные результаты работы опубликованы в 4 журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 5 тезисах докладов на конференциях.

Заключение

В целом диссертация Т.В. Чернышева является завершённой работой, в которой содержатся экспериментальные и численные исследования нарушения стационарности горения разряда с замкнутым дрейфом электронов в ускорителях с анодным слоем. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ. Текст автореферата соответствует тексту диссертации.

Работа отвечает критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор Тимофей Владимирович Чернышев заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсуждены на заседании объединенного научного семинара лабораторий плазменной эмиссионной электроники и прикладной электроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук ИСЭ СО РАН «4» марта 2016 г., протокол № 4.

Заведующий лабораторией плазменной эмиссионной электроники,
д.т.н., профессор

 Коваль Н.Н.

И.о. заведующего лабораторией прикладной электроники, к.т.н.

 Соловьев А.А.

Сведения о составителях отзыва:

Коваль Николай Николаевич, д.т.н., профессор; почтовый адрес: 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3, ИСЭ СО РАН; тел.: 8(3822) 491-706; адрес электронной почты: koval@hcei.tsc.ru; наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН); должность: заведующий лабораторией плазменной эмиссионной электроники.

Соловьев Андрей Александрович, к.т.н.; почтовый адрес: г. Томск, 634055, проспект Академический, 2/3, ИСЭ СО РАН; тел.: 8(3822) 491-651; адрес электронной почты: andrewsol@mail.ru; наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН); должность: и.о. заведующего лабораторией прикладной электроники.