

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Мустафаева Александра Сеит-Умеровича на диссертацию **Закарьяевой Мадины Закарьяевны на тему «Пространственно-временная динамика ионизационных процессов в наносекундных разрядах в инертных газах с протяженным полым катодом»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. «Физика плазмы».

Основа промышленных технологий создания современной электроники - плазменные нанотехнологии. Особое место среди них занимают технологии атомно-слоевого травления и молекулярно-слоевого осаждения. Они позволяют избирательно формировать структуру поверхности материалов на уровне атомарно - молекулярных слоев.

При этом для производства наноэлектроники нового поколения необходимы анизотропные плазменные реакторы, создание которых тоже пока не решенная проблема. Перспективное решение проблемы — использование анизотропных пучково - плазменных импульсных наносекундных разрядов с электродами различных конфигураций.

Разработка экспериментальных и численных методов измерения анизотропных функций распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) для исследований фундаментальных процессов формирования плазменных структур в наносекундных газовых разрядах не менее сложная и актуальная проблема.

Диссертация М.З. Закарьяевой «Пространственно-временная динамика ионизационных процессов в наносекундных разрядах в инертных газах с протяженным полым катодом» посвящена решению именно этих проблем.

Таким образом, **актуальность темы диссертации не вызывает сомнений** как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения.

Новые важные результаты работы

1. Исследованы пространственно-временные характеристики динамики ионизационных процессов в наносекундных разрядах с протяженным полым катодом в гелии, неоне и аргоне для диапазона давлений 1-40 Тор.

2. Проведены численные эксперименты по измерению анизотропных ФРЭЭ и исследована динамика ионизационных процессов в импульсных пучковых разрядах с протяженными полыми катодами различной конфигурации.

3. Экспериментально в пучковых разрядах с полым катодом при давлениях порядка 1 Тор сформированы плоские структуры в виде «плазменного листа» с геометрическими размерами 50x20 мм. Полученный результат важен для создания широко апертурного источника ионов.

4. Создана кинетическая численная модель плазменно-пучкового разряда и выполнен расчет ФРЭЭ в условиях слабой анизотропии функции распределения.

5. Экспериментально исследована динамика ионизационных процессов в зависимости от геометрии полого катода. Показано, что катод с прямоугольной полостью создает однородный плоский плазменный столб с более высокой концентрацией заряженных частиц.

6. Обнаружено, что при амплитудах импульсов напряжения около 1 кВ внутри прямоугольной полости катода фронт волны ионизации разделяется на две части, распространяющихся вдоль боковых поверхностей полости внутри полого катода. При этом после достижения фронтом основания полости в катоде от дна полости формируется обратная волна ионизации, которая заполняет плазмой полость внутри катода.

Достоинства диссертационной работы

Диссертация написана лаконично ясным и понятным языком.

Профессионально представлены экспериментальные приборы, установки и методы исследований.

Заслуживает высокой оценки владение диссертантом современной экспериментальной техникой высокого уровня и профессионализм в применении экспериментальных и численных методов исследований.

Результаты и выводы убедительны, надежны, обоснованы, достоверны и не требуют дополнительных пояснений. В условиях, где это было возможно, автором выполнен анализ данных с помощью законов подобия.

Замечания и вопросы.

1. В диссертации проведены исследования с тремя инертными газами - гелием, неоном, аргоном. При этом, отсутствует анализ специфики инертного газа, объясняющий различия в экспериментальных результатах.

2. В Табл. 7 приведены основные процессы, которые учитывались в численной модели. При этом, не учтены удары второго рода между возбужденными атомами аргона и электронами. Действительно ли этими процессами можно пренебречь в кинетике исследуемого разряда?

3. При построении численной кинетической модели неограниченного плазменно-пучкового разряда (п. 4.4, стр. 92) использованы цилиндрические координаты. Насколько они адекватно описывают реальный, протяженный вдоль катода, щелевой разряд?

4. На рис. 4.8 и 4.9 представлены результаты расчета временной динамики изменения концентрации электронов. Отличие в условиях разряда - это давления газа 1 тор и 5 тор. При этом концентрации электронов отличаются существенно - в точке 400 нс при 5 торах концентрация на 4 порядка больше, чем при 1 торе. В чем причины этого?

Указанные замечания не снижают высокой оценки представленной работы. Основные результаты работы апробированы, являются новыми, оригинальными и получены автором самостоятельно. Достоверность результатов и выводов подтверждается использованием широкого набора

современных экспериментальных методов, воспроизводимостью данных, а также хорошей корреляцией экспериментальных и теоретических результатов.

Диссертация Закарьяевой Мадины Закарьяевны «Пространственно-временная динамика ионизационных процессов в наносекундных разрядах в инертных газах с протяженным полым катодом» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а соискатель Закарьяева Мадина Закарьяевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. «Физика плазмы».

Пункты 9 и 11 указанного Порядка диссертантом не нарушены.

**Член диссертационного совета
Почетный работник высшего
профессионального образования РФ
Зав.кафедрой Общей и технической физики
С.Петербургского Горного университета
доктор физ.-мат. наук, профессор**



Александр Сеит-Умерович Мустафаев

24 апреля 2023 г.



А.С.-У. Мустафаева

Заведующий кафедрой
управления делопроизводства
и документооборота



Е.Р. Яновицкая

24 АПР 2023