

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Сухомлинова Владимира Сергеевича 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».

Исследования высоковольтных импульсных разрядов с полым катодом относятся к фундаментальной проблеме физики плазмы, так как позволяют получить плазменно-пучковый разряд без использования дорогостоящих ускорителей электронных пучков. Интерес к высоковольтным газовым разрядам с отрицательной кривизной поверхности катода, в которой фокусируется электрическое поле, связан в первую очередь, с возможностью получения высокоэнергетичных электронов в самом газе в процессе электрического пробоя. При этом, использование протяженного профилированного щелью катода дает возможность получить однородный разряд в объеме, достаточном для технологических приложений. Такими технологическими приложениями могут быть прецизионные плазма-стимулированные аддитивные технологии, активные среды газовых лазеров, плазменные реакторы для модификации поверхности материалов и другие.

Диссертационная работа М.З. Закарьяевой посвящена экспериментальному исследованию пространственно-временной динамики развития ионизационных процессов в наносекундных разрядах в инертных газах с протяженным полым катодом с различным профилем поверхности катода и построению численных моделей таких газоразрядных систем.

Сказанное позволяет утверждать, что диссертация Закарьяевой М.З. является актуальным научным исследованием.

Научная новизна и наиболее существенные результаты:

Из результатов, полученных в диссертации Закарьяевой М.З., как наиболее существенные отмечу следующие:

1. Выполнены систематические экспериментальные исследования динамики формирования пространственной структуры импульсного разряда с протяженным полым катодом в инертных газах при низких и средних давлениях газа. Из совокупности экспериментальных данных определены основные характеристики развития как открытого, так и ограниченного диэлектрическими стенками разряда. Экспериментально проверено соблюдение соотношения подобия в области достижения максимума импульса тока разряда.
2. Экспериментально получена плазменная конфигурация в виде «плазменного листа» с геометрическими размерами 50x20 мм с использованием высокоэнергетичных электронов, генерированных в наносекундном разряде с протяженным щелевым катодом. Показана возможность использования такой плазменной конфигурации в качестве широкоапертурного источника низкоэнергетичных ионов.
3. Для плазменного столба наносекундного разряда с протяженным полым катодом построена и реализована самосогласованная численная модель расчета ФРЭЭ в двухчленном приближении в условиях слабой анизотропии на основе совместного использования пакетов программ Comsol Multiphysics и LisbOn KInetics Boltzmann. Показано, что ионизационный фронт формируется вблизи анода и распространяется в сторону катода со скоростью примерно 10^7 см/с. Детально проанализирован механизм проникновения плазмы внутрь полости катода. Показано, что после достижения катода

фронт ионизации начинает играть роль виртуального анода и далее область ионизации перемещается внутри полости катода до ее основания.

4. Показано, что в разряде, ограниченном диэлектрическими стенками, при амплитудах импульсов напряжения около 1 кВ внутри прямоугольной полости катода фронт волны ионизации разделяется на две части, распространяющихся вдоль боковых поверхностей полости. После достижения фронтом основания полости в катоде, от дна полости формируется обратная волна ионизации, которая заполняет полость плазмой, что приводит к формированию плазменного столба в полости и в разрядном промежутке. Выполнены сравнительные исследования динамики ионизационных процессов в полном катоде с полостью в виде прямоугольной щели и полукруглой полости.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые с наносекундным временным разрешением проведено систематическое исследование динамики развития пространственной структуры ионизационных процессов в высоковольтном импульсном разряде с протяженным полым катодом в инертных газах. Исследования выполнены в широком диапазоне изменения условий как в открытом, так и в ограниченном диэлектрическом стенками разряде с профилем поверхности протяженного катода в виде прямоугольной щели и полукруглой полости.

Несмотря на отмеченные достоинства диссертационной работы, есть несколько **замечаний**.

1. В исследуемой конструкции разрядной камеры длина электродов (50 мм) почти на порядок больше, чем расстояние между электродами (6 мм). При расчете плотности тока разряда поперечное сечение разряда определяется из оптических картин свечения разряда, однако не указано, является ли разряд однородным вдоль электродов и нет ли контракции разряда.
2. Известно, что разряды в инертных газах очень чувствительны к наличию даже в малых количествах примесей в газе, особенно разряды в гелии. В работе подробно не обсуждается, как контролировалась спектральная чистота газов в разряде.
3. При численном моделировании ионизационных процессов в разряде в самосогласованной численной модели расчета ФРЭЭ на основе совместного использования пакетов программ Comsol Multiphysics и LisbOn KInetics Boltzmann использованы экспериментально измеренные значения импульсного напряжения на электродах и импульсного тока разряда, а также задается начальная концентрация электронов. В работе не обсуждается, исходя из каких соображений выбраны начальные условия для электронной концентрации.
4. При получении за сетчатым анодом ионизованной области в виде «плазменного листа» используются высокоэнергетичные электроны, формируемые в разряде между полым катодом и сетчатым анодом. В таких условиях кинетика электронов должна быть нелокальной. Позволяет ли численная модель, разработанная автором, описывать нелокальность кинетики высокоэнергетичных электронов?

Отмеченные замечания не затрагивают основные результаты диссертационной работы и положения, выносимые на защиту.

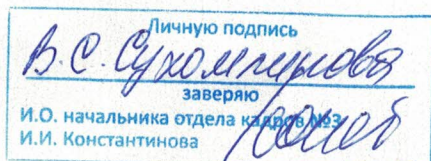
Основные результаты и выводы диссертации получены Закарьевой М.З. и сформулированы впервые, они в достаточной степени обоснованы. **Достоверность** полученных в диссертации результатов подтверждается применением нескольких независимых стандартных экспериментальных методов, тщательным контролем качества полученных результатов, внутренней согласованностью разработанной автором модели формирования и развития ионизационных процессов в наносекундных разрядах с полым катодом.

Диссертация Закарьевой Мадины Закарьевны «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», соискатель **Закарьева Мадина Закарьевна** 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
доктор физ. – мат. наук,
профессор СПбГУ

/Сухомлинов В.С./

27.04.2023



27.04.2023