

ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Тимофеева Николая Александровича 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».

Тема диссертационной работы М. З. Закарьяевой является, безусловно, **актуальной**. Плазменные технологии в создании новых материалов, в том числе – наноразмерных, а также развитие прецизионных технологий нанесения тонких пленок и контролируемого травления для формирования структур нанoeлектроники стали основой многих современных наукоемких промышленных технологий. Уникальными возможностями для этих целей обладают технологии атомно/молекулярно-слоевого осаждения (АСО/МСО) (Atomic Layer Deposition, ALD) и атомно-слоевого травления (АСТ) (Atomic Layer Etching, ALE), которые позволяют управлять свойствами поверхности материала на уровне отдельных атомарных и молекулярных слоев. Разработка высокоэффективных и технологически надежных плазменных реакторов для этих целей является чрезвычайно актуальной задачей. Одним из путей создания таких реакторов является использование газовых разрядов с полым катодом различных конфигураций, в которых, наряду с вторичными медленными плазменными электронами, формируется группа быстрых электронов. Особенно перспективными для этих целей выглядят импульсные разряды наносекундной длительности. Следует отметить, что исследования в данной области имеют также и большое **практическое значение**, поскольку их результаты могут быть использованы при разработке широкоапертурных плазменных источников ионов. Результаты работы без сомнения будут способствовать развитию понимания механизмов формирования плазменных структур.

Диссертационная работа М. З. Закарьяевой «Пространственно-временная динамика ионизационных процессов в наносекундных разрядах в инертных газах с протяженным полым катодом» посвящена исследованию динамики развития ионизационных процессов в наносекундных газовых разрядах с протяженным полым катодом в инертных газах при низких и средних давлениях и разработке цифровых моделей широкоапертурных плазменных источников на основе наносекундных газовых разрядов с полым катодом.

В работе получены следующие **важные новые результаты**.

1. Экспериментально исследована пространственно-временная динамика развития ионизационных процессов в наносекундных разрядах с протяженным полым катодом в инертных газах (гелии, неоне и аргоне) в диапазоне давлений газа 1-40 Тор.
2. Показано, что с помощью газоразрядной системы с протяженным полым катодом при давлениях газа порядка 1 Тор за сетчатым анодом можно формировать плазменную конфигурацию в виде «плазменного листа» с геометрическими размерами 50x20 мм с использованием высокоэнергетичных электронов, генерированных в разряд.
3. Разработана численная модель и приведены результаты расчетов динамики развития ионизационных процессов в импульсных разрядах с протяженными полыми катодами с различной конфигурацией полости внутри катода на основе модуля Plasma пакета программ Comsol Multiphysics с использованием модельной ФРЭЭ с группой высокоэнергетичных электронов.

4. Предложена самосогласованная численная модель и представлены результаты расчета ФРЭЭ в плазменном столбе разряда в условиях слабой анизотропии функции распределения электронов на основе совместного использования пакетов программ Comsol Multiphysics и LisbOn KInetics Boltzmann.

5. Экспериментально 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 внутрь полого катода. При этом после достижения фронтом основания полости в катоде от дна полости формируется обратная волна ионизации, которая заполняет плазмой полость внутри катода.

В качестве **достоинств** представленной работы хотелось бы отметить следующее.

Диссертация написана ясно и понятно, сделанные выводы убедительно обоснованы и не требуют дополнительных пояснений. Особенно хотелось бы отметить тщательное и очень подробное описание экспериментальной установки, методов исследований и их обоснование. Это производит особенно сильное впечатление, если принять во внимание сложность экспериментальной техники, которая находится на самом высоком современном уровне, и использованных методов исследований. Также хотелось бы отметить качество анализа полученных результатов. Не все они могут быть приняты как бесспорные, но их интерпретация и непротиворечивость убеждают в достоверности полученных результатов. Очень приятное впечатление производит попытка соискателя анализа полученных результатов с помощью законов подобия. Эти результаты, с моей точки зрения, чрезвычайно важны как имеющие большой и глубокий физический смысл.

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

1. При расчете функций распределения используется гидродинамический подход, что связано, по-видимому, с использованными кодами для расчетов (COMSOL и др.). Однако системы в присутствии в плазме электронного пучка, скорее всего, следует описывать в нелокальном приближении. Насколько гидродинамическое описание применимо для рассматриваемой плазмы?
2. Из рисунков 3.1, 3.3, 3.4 и др. видно, что разряд в отсутствие диэлектрических стенок развивается от катода к аноду. В то же время, для разряда, ограниченного диэлектрическими стенками утверждается, что разряд развивается от анода к катоду (стр. 71, рис. 3.17-3.19). Так ли это? Более того, не вполне понятно, почему разряд развивается именно от анода к катоду, хотя первичные электроны, скорее всего, возникают вблизи катода?
3. В Таблицах 1 и 2 приведен коэффициент электронной эмиссии γ_c . Видно, что он меняется немонотонно со временем (почему?) и его величина достаточно большая (в большинстве случаев больше единицы). Что это за коэффициент и является ли он тем же самым, что и коэффициент Таунсенда γ для вторичной ион-электронной эмиссии, который, как правило, заметно меньше единицы?
4. Есть замечание по поводу строгости изложения материала. Так, нет описания обозначений, входящих в формулы (4.1)-(4.8), (4.14)-(4.22).
5. Полученная конфигурация в виде «плазменного листа» представляет большой практический интерес. Оформлен ли этот результат в виде заявки на патент?

Указанные замечания носят частный характер и не снижают высокой оценки представленной работы. Все основные результаты являются новыми, оригинальными и получены автором самостоятельно. Достоверность результатов и выводов работы подтверждается использованием широкого набора современных экспериментальных методов, воспроизводимостью полученных данных, а также согласованностью экспериментальных и теоретических результатов.

Диссертация Закарьяевой Мадина 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», 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.

Председатель диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор,
заведующий кафедрой оптики СПбГУ



Тимофеев Николай Александрович

18 апреля 2023 г.