

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Солихова Давлата Куватовича 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 физических процессов в высоковольтных импульсных электрических разрядах с полым катодом относятся к числу фундаментальных задач физики, интересных для практических приложений. Во многих современных технологиях получения наноразмерных полупроводниковых структур широко применяются плазменные реакторы на основе разрядов с полым катодом. Хотя классические газовые разряды с полым катодом исследуются в течение длительного времени, уровень понимания кинетики ионизационных процессов в высоковольтных наносекундных разрядах с полым катодом весьма далек от совершенства. При наличии высоких значений электрических полей электронная компонента плазмы приобретает анизотропные свойства, что позволяет конструировать плазменные реакторы, пригодные для технологических приложений, например, в микроэлектронике, при модификации поверхности материалов, для получения широкоапертурных электронных и ионных потоков.

Особый интерес представляют исследования динамики развития пространственной структуры разряда при различных профилях поверхности катода, поскольку такие газоразрядные системы дают возможность управлять параметрами плазмы под конкретные технологические требования. Поэтому **актуальность** выбранной М.З.Закарьяевой темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Диссертационная работа М.З.Закарьяевой посвящена исследованию пространственно-временная динамика ионизационных процессов в наносекундных разрядах в инертных газах с протяженным полым катодом с различным профилем поверхности катода. Интерес к таким разрядам связан с применением подобных конструкций разрядов в прецизионных аддитивных технологиях атомно-слоевого травления поверхности материалов микро- и нанoeлектроники.

Научная новизна и наиболее существенные результаты:

В диссертации впервые с наносекундным временным разрешением экспериментально исследована пространственно-временная динамика развития ионизационных процессов в наносекундных разрядах с протяженным полым катодом при различных профилях поверхности катода: в виде прямоугольной щели и в виде полукруглой полости.

Из экспериментальных результатов на различных стадиях развития разряда определены основные его характеристики и проверено соблюдение соотношения подобия в области достижения максимума импульса тока разряда.

Впервые экспериментально с использованием высокоэнергетичных электронов, генерированных в наносекундном разряде с протяженным полым катодом за сетчатым анодом получена плазменная конфигурация в виде «плазменного листа». Показана возможность масштабирования «плазменного листа» для получения различных его геометрических размеров.

Впервые 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 и численно исследована динамика ионизационных фронтов как между электродами, так и внутри полости катода.

В работе получены следующие наиболее существенные результаты:

1. Экспериментально с наносекундным временным разрешением исследована динамика формирования пространственной структуры импульсного разряда с протяженным полым катодом и на различных стадиях формирования и развития разряда определены основные его характеристики. 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.
5. Выполнены сравнительные исследования динамики ионизационных процессов в зависимости от формы профиля полости в катоде. Показано, что катод с прямоугольной полостью позволяет получить однородный плоский плазменный столб по центру промежутка с более высокой концентрацией заряженных частиц, в то время как в разряде с полукруглой полостью формируются две ионизационные области, примыкающие к границам полукруглой полости в катоде.

Несмотря на отмеченные достоинства диссертационной работы, есть несколько замечаний.

1. При амплитудах импульсов напряжения на электродах 0.7 кВ на заднем фронте импульса тока величина тока разряда монотонно снижается (рис.3.7), в то время как при амплитудах напряжений на электродах выше 1.5 кВ наблюдается второй максимум импульса тока (рис.3 10). С чем связан второй максимум импульса тока, с колебаниями в измерительной цепи или с физическими процессами в разряде?
2. В работе выполнены экспериментальные исследования импульсов тока разряда и напряжений на протяженных электродах в наносекундном диапазоне времен,

- однако не указано, как калибровались шунты и делители напряжения, и как проверялся их отклик на перепад тока и напряжения.
3. При численном моделировании кинетических процессов в разряде не учитываются процессы с участием молекулярных ионов и эксимерных молекул инертных газов, которые образуются в результате конверсии атомарных ионов в молекулярные и в процессах трехчастичных столкновений возбужденных атомов с нейтральными частицами. Проводился ли анализ роли молекулярных частиц в ионизационных процессах в исследованных условиях?
 4. В работе нет данных о численном моделировании кинетических процессов в «плазменном листе», наиболее перспективном с точки зрения практического применения. Применима ли разработанная автором самосогласованная численная модель для моделирования кинетических процессов в «плазменном листе»?

Указанные замечания не снижают общий высокий научный уровень работы и не влияют на основные результаты работы и положения, выносимые на защиту.

Достоверность экспериментальных данных обеспечивается использованием современных автоматизированных цифровых средств и методик проведения исследований. Моделирование и расчеты основных характеристик разрядной плазмы выполнены на основе признанных моделей с использованием современной вычислительной техники. Обоснованность сделанных выводов обеспечивается внутренней согласованностью разработанной автором модели формирования и развития плазменных структур в наносекундных разрядах с полым катодом, а также согласием выводов с данными собственных экспериментов.

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», 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,
доктор физико - математических наук,
профессор кафедры теоретической физики
физического факультета
Таджикского национального университета

Д.К. Солихов

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



Э.Ш. Тавкиев

25.04.23