

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Семенюк Натальи Степановны «Нестационарная кинетика начальной стадии высоковольтного пробоя газоразрядных промежутков», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника.

Глубокое понимание физики газовых и вакуумных разрядов, особенно короткоимпульсных нестационарных процессов, при которых формируются направленные потоки высокоэнергетичных электронов и ионов, во многом определяющих генерацию разрядной плазмы, необходимо при разработке приборов плазменной электроники нового поколения. В связи с этим развитие новых современных методов теоретического анализа и численного расчета в рамках кинетического подхода для выяснения ключевых механизмов нестационарного электрического разряда, таких как разряд высокого давления с убегающими электронами и разряд низкого давления с «горбом потенциала», определяет актуальность темы диссертации.

Изучение текста диссертации и публикаций ее автора в рецензируемых научных журналах подтверждает, что данная диссертационная работа соответствует требованиям и критериям, установленным действующим Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней с изменениями Постановления Правительства РФ от 21.04.2016 г. № 335 «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней».

Диссертационная работа содержит 139 страниц текста с 88 рисунками, состоит из Введения и 4 глав, Заключения и списка литературы из 143 наименований.

**Во Введении** обоснована актуальность, формулируется цель и основные задачи, решаемые автором в диссертации; излагается предлагаемый автором подход к решению поставленных задач; характеризуется степень новизны полученных результатов и их практическая значимость; приводятся научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен обзор теоретических и экспериментальных работ по высокоскоростному протеканию разряда и обозначены трудности теоретического изучения таких процессов, связанные с отсутствием самосогласованной модели для электромагнитных полей и групп частиц, а также с ограничением вычислительных ресурсов при численном моделировании разрядов высокого давления (PIC методы).

Предлагается для описания пространственно-временной эволюции больших ансамблей заряженных частиц в условиях их сильной неравновесности в газовом разряде использование одномерного кинетического уравнения для функции распределения электронов и ионов по координате и импульсу.

**Во второй главе** представлена гибридная численная модель разряда для описания плазмы газового разряда в дрейфово-диффузионном приближении и решения уравнения Больцмана для функции распределения убегающих электронов по импульсам. Продемонстрированы возможности использования одномерного кинетического модуля для расчета временных и энергетических характеристик высокоэнергичных электронов в плоской, коаксиальной и трехэлектродной разрядных системах при атмосферном давлении. Модель позволила проследить переходной процесс пробоя и формирование квазистационарной формы горения разряда, объяснить механизм набора энергии убегающими электронами и малую длительность импульса тока на электронного аноде, рассмотреть влияние уровня предварительной ионизации газа в разрядном промежутке на характеристики потока убегающих электронов.

**В третьей главе** представлена одномерная кинетическая модель разряда, включающая эволюцию как ускоренных, так и плазменных электронов. Представлены результаты расчетов в широком диапазоне давлений (1-600 Торр) динамики тока и напряжения на коаксиальном диодном промежутке, основных характеристик ансамбля убегающих электронов (энергетический спектр и динамику тока убегающих электронов). Получено объяснение наблюдаемых в экспериментах немонотонных зависимостей тока быстрых электронов от давления газа и формирования двух максимумов на временном профиле тока убегающих электронов. Продемонстрировано влияние на количество и энергию быстрых электронов скорости роста напряжения на разрядном промежутке, давления газа, а также радиуса кривизны катода, находящееся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

Показано, что в неоднородном магнитном поле большинство убегающих электронов генерируется в прикатодной области разряда до момента экранировки электрического поля плазмой, а «аномальное» ускорение электронов связано с усилением электрического поля перед фронтом волны ионизации из-за вытеснения поля из плазмы.

Результаты расчетов по влиянию эмиссионной способности катода, согласующиеся с экспериментами, показали, что минимальное время запаздывания составляет  $\sim 330$  пс при «среднем коэффициенте шероховатости»  $\sim 3$ . Анализ этих процессов представляет особый интерес в связи с проблемой прохождения через область

разрядного промежутка импульсов напряжения длительностью, сравнимой по порядку величины с временем пролета убегающих электронов диодного промежутка.

Показана важность учета упругих столкновений при моделировании разряда на развитие его динамики и формирование группы убегающих электронов.

**В четвертой главе** на основе самосогласованной кинетической модели, учитывающей дрейфовую токовую ионную компоненту, в нестационарном неоднородном электрическом поле исследуется электрополевой механизм генерации анодонаправленного потока быстрых ионов при инициировании разряда в газе низкого давления (1 - 10 Па). Продемонстрировано, что в диоде в процессе развития пробоя формирование «горба потенциала» обуславливает ускорение к аноду положительных ионов со средней энергией кратно превышающей приложенное к промежутку напряжение (умноженное на элементарный заряд), при этом, процессы образования «горбов» существенно зависят от исходных параметров задачи (давление, длина зазора, содержание газа, механизм выброса и т. д.).

**В Заключение** сформулированы основные выводы диссертационной работы.

К основным, наиболее значимым, на мой взгляд, результатам работы, определяющим ее научную новизну и практическую значимость сформулированных положений и выводов, можно отнести следующее:

1. Разработана математическая модель одномерной нестационарной кинетики электронного газа в субнаносекундном разряде высокого давления, в однородном и резко неоднородном электрических полях на основе кинетического уравнения Больцмана для электронов и уравнения полного тока для напряженности электрического поля, позволяющая рассмотреть характеристики убегающих электронов и их влияние на динамику разряда.

2. Представлены результаты численного моделирования радиального пробоя газонаполненного коаксиального промежутка в поле бегущей волны длинной линии с учетом эмиссии первичных электронов на катоде, объемной ионизация газовой среды плазменными и убегающими электронами, продемонстрировано согласие рассчитанных параметров потока убегающих электронов с экспериментальными данными.

3. Получено решение одномерной задачи нестационарной кинетики электронов и ионов в начальной стадии разряда низкого давления и формирования потока ионов на анод с кинетическими энергиями, превышающими величину, соответствующую приложенному к промежутку напряжению.

Можно отметить некоторые недостатки работы:

1. Следовало бы пояснить, какие процессы накладывают ограничения на развитие пробоя и отражаются ли эти условия в предложенной модели?

2. В работе указывается на формирование короткой стадии «горба потенциала» в процессе развития пробоя. Может ли представленная модель описывать формирование «горба потенциала» при развитии и квазистационарного горения разряда низкого давления (0.02-0.5 Па) с полым анодом, размеры которого значительно меньше длины пробега электронов?

3. В работе показано влияние «коэффициента шероховатости» катода на характеристики импульса тока быстрых электронов, а что можно сказать о влиянии материала катода?

4. В Заключении используются фразы: «в узком временном интервале» (стр. 123, 1 абзац), «существует оптимум (чего?), при котором...» (стр. 124, 5 абзац диссертации, 16 стр. 4 абзац автореферата), которые не вполне корректно описывают условия и процессы, по которым делаются заключения.

Указанные недостатки не затрагивают положений и выводов диссертации и не снижают научную и практическую ценность диссертационной работы Семенюк Н. С.

Результаты диссертации докладывались на 14 международных конференциях и опубликованы опубликована в 26 работах, из них 19 индексируемых в Web of Science или SCOPUS, 26 в РИНЦ.

Автореферат и опубликованные научные работы в полной мере отражают основное содержание диссертационной работы.

Уровень решаемых задач и поставленная цель работы соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а диссертация - специальности 05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника.

Диссертационное исследование Семенюк Натальи Степановны «Нестационарная кинетика электронов, ионов и электрического поля в начальной стадии высоковольтного пробоя газоразрядных промежутков» по критериям актуальности, научной новизны, практической значимости, обоснованности и достоверности выводов соответствует

требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней». Диссертант Семенюк Наталья Степановна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника.

Официальный оппонент

Профессор Отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники (ИШИТР) ФГАОУВО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (НИ ТПУ),

доктор физико-математических наук,

старший научный сотрудник



Коваль Т. В.

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, ТПУ

Тел: 8 (3822) 606138,

E-mail: [tvkoval@tpu.ru](mailto:tvkoval@tpu.ru)

Подпись Коваль Тамары Васильевны удостоверяю

Ученый секретарь Ученого совета ТПУ



Кулинич Е.А.

Дата: 18 апреля 2022 г.