

Отзыв научного руководителя

на диссертацию Мамонтова Юрия Игоревича «ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТА УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ГАЗАХ РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки.

Диссертационная работа Ю.И. Мамонтова посвящена изучению методами численного моделирования Монте-Карло и «частица-в-ячейке» явлений, сопровождающих прохождение ускоренных электронов через газовые среды с давлением вплоть до 40 атм., при различных геометрических и силовых параметрах внешнего электрического поля. Пучки ускоренных электронов нашли широкое применение в современной технике, например, для генерации рентгеновского, СВЧ и лазерного излучений, обработке материалов (поверхностная закалка, плавка, электронно-лучевая сварка) и пр. Несмотря на это, многие аспекты физики формирования ускоренных электронных пучков в газовых средах с различной плотностью, включая форвакуумные системы, до сих пор слабо изучены и остаются непонятными и нуждаются в подробном теоретическом рассмотрении. Среди них, в первую очередь, следует выделить формирование пучков убегающих электронов при давлениях газа вплоть до 40 атм и явления, связанные с плазмообразованием при формировании средневакуумных и форвакуумных электронных пучков. Поэтому исследования, представленные в данной работе, являются **актуальными** и будут полезны при разработке электрофизических устройств и технологий нового поколения.

Представленная работа состоит из пяти глав, содержит обзор современного состояния рассматриваемых проблем (**первая глава**) и четыре основных раздела. **Во второй главе** описаны разработанные и реализованные численные модели в рамках методов Монте-Карло и «частица-в-ячейке» для исследования прохождения пучков электронов через газовые среды различного давления и состава. Приводится сравнение результатов вычисления ряда кинетических коэффициентов с известными экспериментальными данными по искомым величинам и их эмпирическими аппроксимациями. Показано хорошее качественное и количественное согласие результатов расчета константы скорости ионизации, скорости дрейфа электронов и ионизационного коэффициента Таунсенда с литературными значениями. **В третьей главе** в рамках модели Монте-Карло показано, что в импульсных разрядах высокого давления наличие областей локального усиления поля вблизи катодных микронеоднородностей существенно снижает величину приведенной напряженности поля, необходимую для перехода электронов в режим непрерывного ускорения, т.е. формирование пучка «убегающих» электронов. Этот эффект усиливается с ростом давления газа и проявляется как в однородном, так и в неоднородном макроскопическом электрическом поле. При этом причиной уменьшения пороговой приведенной напряженности поля с ростом давления является рост абсолютной величины напряженности поля в разрядном промежутке, приводящий к увеличению падения напряжения вблизи микронеоднородностей, и, как следствие, увеличению энергии, которую получает электрон при прохождении области усиленного поля. **Четвертая глава** посвящен исследованию ускорения электронов вблизи параболического катода малого радиуса кривизны. Показано, что для данных условий необходимо обеспечивать некоторую конечную величину падения напряжения в прикатодной области усиленного поля, которая

позволяет электронам набрать энергию, достаточную для предотвращения их термализации при удалении от катода. Это накладывает дополнительные ограничения снизу на величину напряжения, достаточную для генерации «убегающих» электронов. При этом для катодов с большим радиусом кривизны остается справедливым классический критерий убегания. Исследованию динамики электронного тока, эмитируемого из расширяющейся взрывоэмиссионной плазмы в полусферическом диоде с модельным азотным заполнением до 5 Па на искровой стадии вакуумного разряда посвящена **пятая глава**. На основе результатов моделирования показано, что ионизация остаточного газа под давлением $\sim 0,1$ Па практически не влияет на распределение электрического поля в диоде и, следовательно, на протекающий электронный ток. Заметное влияние начинает проявляться при давлениях азота 1 Па и выше. Так, при остаточном давлении 5 Па электронный ток в диоде может в 2,5 раза превосходить электронный ток в вакуумном случае, вследствие частичной компенсации объемного заряда электронного пучка зарядом образующихся ионов остаточного газа. **В заключении** изложены основные результаты диссертации.

Общие характеристики работы. Материал диссертации и автореферата полностью соответствует отрасли физико-математических наук специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки. Содержание диссертации отвечает пунктам 5, 7, 9 паспорта специальности. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

В ходе выполнения работы Ю.И. Мамонтовым осуществлена реализация применяемых математических и численных моделей, программирование и проведение расчетов. Обобщение результатов исследования, формулировка выводов и написание текста диссертации и автореферата также принадлежат лично автору.

Обоснованность полученных научных положений обусловлена, прежде всего, четкостью формулирования цели теоретических исследований, находящихся в тесной связи с проводимыми фактически одновременно экспериментальными исследованиями. Важно отметить, что для достижения этих целей использовались методы и подходы, основанные на современных представлениях физики газового разряда и методах математического моделирования. Также она подтверждена обсуждением результатов исследований на международных и всероссийских научных конференциях, и симпозиумах. Основные результаты работы представлялись и докладывались на 14 конференциях: 4 конференции молодых ученых ИЭФ УрО РАН (2017, 2018, 2019, 2021), 4 всероссийских молодежных конференции: XXIII, XXIV и XXV Всероссийская научная конференция студентов-физиков (2017, 2018, 2019), XI Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инноваций» (2017), 2 международных молодежных конференции: IV и V Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации» (2017, 2018) и 4 международных конференции: 14th and 15th International Conference «Gas Discharge Plasmas and Their Applications» (2019, 2021), 21st and 22nd International Symposium on High-Current Electronics (2020, 2022).

По результатам исследований опубликовано 26 научных работ. Из них 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, включая статью в журнале рейтинга Q1. 10 работ опубликованы в зарубежных изданиях, индексируемых в системах WoS/Scopus.

Достоверность основных положений, научных выводов и результатов диссертационной работы подтверждается согласием результатов моделирования и экспериментальных данных, достаточной обоснованности сделанных допущений, а также систематическим характером исследований. Так, например, в работе в отдельных разделах описана процедура тестирования наиболее трудоемких расчетных алгоритмов по таким

параметрам как константа скорости ионизации, скорости дрейфа электронов, ионизационного коэффициента Таунсенда, функции распределения электронов по энергиям, частоты убегания электронов. При этом полученные результаты хорошо согласуются либо экспериментальными данными, либо с результатами расчетов других авторов.

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой совокупность полученных результатов и научных положений может быть квалифицирована как существенный вклад в создание численных методик, позволяющих описывать формирование и транспорт пучка электронов в газовых разрядах высокого давления (явление «убегания» электронов) и в условиях технического вакуума с остаточным давлением воздуха до нескольких паскалей. Полученные результаты, несомненно, имеют важное значение, как для фундаментальной составляющей физики газового разряда, так и для развития высоковольтной импульсной техники. Диссертация представляет собой целостную научную работу, содержит совокупность выносимых на защиту научных результатов и положений, свидетельствует о личном вкладе автора. Считаю, что диссертация соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Мамонтов Юрий Игоревич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки.

Научный руководитель,
с.н.с. ИЭФ УрО РАН, к.ф.-м.н., доцент

Уйманов И.В.



10.10.2022

Подпись Уйманов И.В. заверяю

Ученый секретарь
к.ф.-м.н.

Е.Е. Кокорина

