

Отзыв

официального оппонента, доктора физико-математических наук Майорова Сергея Алексеевича на диссертационную работу Али Рафид Аббас Али «**Нелокальные ионизационные и волновые процессы в импульсных разрядах атмосферного давления**», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04—«Физическая электроника».

Диссертационная работа Али Рафид Аббас Али посвящена современной актуальной проблеме.

Объемные разряды при высоких давлениях газа нашли широкое применение в различных технических приложениях (например, газовые лазеры, плазменные реакторы и др.). Объемная форма горения разряда при высоких давлениях газа является неустойчивым, быстро контрагируется в искровой канал. При этом в активной среде газового лазера происходит срыв генерации когерентного излучения. Поэтому переход объемного разряда (ОР) в канальную стадию является главным физическим препятствием для наращивания энергии излучения лазеров и является предметом интенсивных исследований. Физика процессов в таких разрядах достаточно сложна и к настоящему времени недостаточно исследована. Все это требует количественных данных о процессе формирования разряда, прежде всего данных о динамике электрического поля и распределения концентраций заряженных частиц в разрядном промежутке, их относительном энергокладе, о токе разряда и напряжении на промежутке. Представляет научный интерес как исследование влияния начальных условий на электрические, оптические и спектральные характеристики импульсных разрядов, так и изучение механизмов контрагирования объемных разрядов и их развитие в режиме сильноочной стадии протекания тока, а также исследование формирования ударных волн в этих газах.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, состоящего из 169 наименований. Объем диссертации – 159 страниц, включающих 43 рисунка и 14 таблиц.

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы, формулируется цель исследования, раскрывается научная новизна и практическая значимость.

Первая глава диссертации содержит подробный литературный обзор экспериментальных и теоретических исследований, описывающих различные стадии формирования таунсендовского, стримерного и объемного разрядов в газах высокого давления. Особое внимание уделяется как моделям, описывающим начальные стадии пробоя на основе развития ионизационных фронтов, так и современным представлениям о формировании стримерных разрядов. Описаны условия, определяющие режим формирования и стационарного горения ОР. Изучены роль приэлектродных процессов в формировании искрового канала, амплитудно-временные, спектральные,

излучательные и поглощательные характеристики самостоятельных импульсных разрядов. Представленный обзор достаточно отражает современное состояние исследуемых вопросов.

Вторая глава диссертации посвящена описанию экспериментальной установки и методов измерений параметров плазмы импульсных разрядов в инертных газах атмосферного давления

Учитывая малые времена развития процессов при импульсных разрядах, экспериментальная установка удовлетворяет следующим требованиям: временное разрешение электрических параметров составляло ~ 5 нс, оптических картин свечения ~ 5 нс и спектральных характеристик ~ 10 нс. Методы исследования, использованные в работе, являются современными и отвечают поставленной задаче по получению достоверной информации с необходимой погрешностью, временным и пространственным разрешением.

В третьей главе приведены результаты исследования пространственно - временной динамики формирования и развития импульсного разряда в инертных газах (*He, Ar*) высокого давления.

Результаты экспериментальных исследований в аргоне показывают, что в предварительно ионизированной среде ($n_0 \approx 10^7 \text{ см}^{-3}$) при незначительных перенапряжениях $W=10-100$ % возможна объемная форма протекания разряда. Формирование плазменного столба происходит в процессе распространения к катоду волны ионизации со скоростью $\approx 2-5 \cdot 10^7 \text{ см/с}$. По мере продвижения фронта свечения к катоду электронная концентрация в нем возрастает и достигает значений $\approx 10^{13}-10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Разработана двумерная осесимметричная модель для анализа поведения пространственного распределения параметров импульсного разряда в гелии и аргоне высокого давления. Показано, что с приходом волны ионизации на катод происходит релаксация основных параметров плазмы и электрического поля в катодном слое. Выполнены расчеты формирования объемного разряда без учета и с учетом нелокальности ионизационных и дрейфовых характеристик электрона. Получено, что использование нелокальных поправок приводит к увеличению скорости волны ионизации, а основные характеристики разряда изменяются незначительно и с приемлемой точностью могут рассчитываться в рамках локального подхода.

В четвертой главе диссертации по результатам исследования спектральных характеристик и кинетических процессов в импульсных разрядах инертных газов атмосферного давления.

Показано, что с увеличением величины приведенной напряженности электрического поля интенсивности излучения в спектральных линиях увеличивается, а с увеличением энергозатрат в разряд растет как относительная интенсивность спектральных линий, так и появляются новые спектральные линии исследуемого газа и материала вещества электродов.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию кинетические характеристики и оптическое излучение сильнооточных импульсных разрядов в инертных газах (*He, Ar*) высокого давления.

Показано, что в аргоне начиная с некоторого критического напряжения (зависящего от давления), переход к искровому каналу не наблюдается при вкладываемой энергии ≤ 1 Дж и при перенапряжениях более 75% формируется сильноточный диффузный разряд с удельной мощностью $\sim 10^7$ Вт/см³, плотностью тока $\sim 10^3$ – 10^4 А/см², концентрацией электронов $\sim 10^{17}$ см⁻³ и температурой ~ 1 эВ. Основным механизмом ионизации является ступенчатая ионизация, а каналом гибели электронов - диссоциативная рекомбинация.

Изучены особенности спектра излучения исследуемого газа и спектра материала вещества электродов при различных начальных условиях, а именно в режиме однородного горения, в режиме перехода в искровой канал и в режиме перехода в сильноточный диффузный разряд. Показано, что спектр прикатодной плазмы характеризуется интенсивными линиями материала вещества электродов.

В заключении приведены основные результаты диссертации. Их достоверность, а также обоснованность научных положений и выводов подтверждается сравнением с результатами других работ других авторов и удовлетворительным согласием результатов экспериментальных и численных исследований и поэтому не вызывают сомнений.

По диссертационной работе Али Рафид Аббас Али имеются замечания.

- 1) Автор разработал двумерную осесимметричную модель для анализа поведения пространственного распределения параметров импульсного разряда в гелии и аргоне высокого давления и представлено моделирование для времен на уровне несколько десятков нс. При этом потоки для заряженных частиц записаны с учетом диффузии. Было бы целесообразно указать времена, при которых надо учитывать диффузию.
- 2) Автору диссертации следовало бы уточнить, на сколько здесь важен нагрев газа в рассматриваемой постановке на временах в несколько десятков нс?
- 3) Стоило бы в рамках двумерной модели изучить кинетику возбужденных атомов в разряде.

Приведенные замечания не влияют на положения, выносимые на защиту и не снижают ценность полученных результатов.

Диссертационная работа Али Рафид Аббас Али «Нелокальные ионизационные и волновые процессы в импульсных разрядах атмосферного давления» является научным исследованием с несомненной научной значимостью и оригинальностью, в которой проведены экспериментальные и теоретические исследования процессов в импульсных разрядах в инертных газах высокого давления 1-5 атм.

Научные положения диссертации базируются на корректно сформулированных допущениях и использованных в работе математических методов исследования. Достоверность ее результатов подтверждается корректным использованием широко применяемых экспериментальных

методик, а также качественным совпадением результатов численных расчетов с результатами измерений.

Содержание диссертационной работы полностью соответствует ее названию и специальности 01.04.04 - «Физическая электроника». Диссертация написана логичным, аргументированным и ясным языком. Автореферат соответствует содержанию диссертации и отражает ее основные положения. Основные результаты диссертации в полной мере отражены в 16 научных статьях, 6 из которых опубликованы в журналах из перечня ВАК, и докладывались на отечественных и международных конференциях.

На основании изложенного считаю, что представленная к защите диссертационная работа **«Нелокальные ионизационные и волновые процессы в импульсных разрядах атмосферного давления»** полностью удовлетворяет п.8 «Положения о порядке присуждения учёных степеней ВАК РФ», а ее автор, Али Рафид Аббас Али заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника».

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Федерального государственного
учреждения науки
Института общей физики им. А.М. Прохорова
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38.

тел: +7 499 135-02-47, mayorov_sa@mail.ru

Майоров С.А.

Подпись С.А. Майорова удостоверяю
Заместитель директора ИОФ РАН

С.В. Гарнов

Дата: 15 сентября 2017 г.

