

Отзыв

официального оппонента Попова Олега 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 экспериментальному и теоретическому изучению нелокальных процессов, протекающих в импульсных высоковольтных наносекундных разрядах высокого давления в инертных газах. Она лежит в русле исследований в области физики высоковольтного импульсного пробоя, проводимых на физическом факультет Дагестанского государственного университета с начала 70-х годов прошлого века.

Тема диссертации представляется актуальной не только из-за научной ценности полученных в ней результатов исследования механизмов формирования ударных волн, распространяющихся из области расширяющегося катодного пятна по слабоионизованной плазме высокого давления. Она актуальна и потому, что результаты исследований соискателя могут быть использованы для разработки и оптимизации мощных разрядных газовых лазеров и плазмохимических реакторов. Результаты исследования формирования объемного разряда (ОР) высокого давления, возникающего на начальной стадии пробоя, и условий «предотвращения» его контрагирования и перехода в сильноточный диффузный разряд (СДР) могут быть использованы при разработке импульсных тиратронов и коммутаторов.

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

Во **введении** соискатель приводит убедительные аргументы в пользу актуальности темы его диссертации, определяет объект исследования, формирует поставленные задачи, приводит основные положения работы, выносимые на защиту, обосновывает научную новизну и практическую ценность результатов диссертации.

Первая глава диссертации содержит подробный анализ экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованиям трех стадий импульсного пробоя: лавинной, стримерной и искровой. Проведено обсуждение работ по приэлектродным процессам, в частности, их

роли в формировании ударной волны и искрового канала. Подробно обсуждены работы, изучавшие роль предионизация газа в зажигании и формировании объемного разряда, приведены аналитические модели, описывающие на основе различных представлений (ионизационные фронты, стример) начальные стадии пробоя. В конце первой главы приводятся результаты экспериментальных исследований электрических и излучательных характеристик плазмы объемного и диффузного разрядов.

Вторая глава диссертации посвящена описанию объекта исследований, экспериментальной установки и методик измерения электрических, спектральных и излучательных характеристик импульсных наносекундных высоковольтных разрядов в инертных газа высокого давления. Приведено подробное описание схемы генератора импульсного напряжения и методики регистрации пространственно-временного развития разряда.

В **третьей главе** приведены результаты исследования влияния начальных условий (напряженности электрического поля, давления инертного газа, плотности разрядного тока) на пространственно - временную динамику формирования и развития импульсного разряда и его различных стадий в инертных газах (гелий, аргон) высокого давления 1-5 атм в разрядной камере с межэлектродным расстоянием 1 см. Исследуется роль процессов на электродах и в приэлектродных слоях, в частности роли катодного пятна, на возникновение и развитие контракции.

В этой же главе излагается предложенная диссертантом двумерная осесимметричная модель пространственного распределения параметров импульсного разряда с предварительной ионизацией газа высокого давления. Модель описывает начальные стадии формирования низкотемпературной плазмы газового разряда, включая структур катодного и анодного слоев. Проведены расчеты пространственно-временного распределения напряженности поля и концентрации электронов в разрядном промежутке с учетом и без учета нелокальности ионизационных и дрейфовых процессов.

В **четвертой главе** диссертации по результатам измерений был рассчитан энерговклад в разряд в процессе его развития для разных значений напряженности электрического поля. Проведены расчеты проводимости, температуры электронов и частот столкновений заряженных частиц между собой и с нейтральными атомами. Установлен критерий определения слабо- и сильно-ионизованной плазмы. Там же проведены измерения спектрального состава оптического излучения плазмы и приэлектродных слоев импульсного наносекундного разряда в гелии в режиме объемного разряда однородного горения и перехода его в искровой канал, либо в сильноточный диффузный разряд. Обнаружены спектральные линии излучения не только атомов

рабочего газа (гелия), но и материала катода (железо) на длинах волн от 337 до 925 нм. Показано, что интенсивность спектральных линий растет с увеличением межэлектродного напряжения.

Установлено, что появление в спектре разряда линий железа связано с процессами на электродах, обуславливающих переход режима разряда от объемного в контрагированный разряд. На основании полученных в работе результатов соискатель высказывает предположение, что появление в разрядном промежутке атомов материала электродов и, соответственно, спектральных линий излучения его атомов, связано со взрывными процессами на катоде, эмиссией или эрозией электродов.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию сильноточных диффузных разрядов высокого давления в инертных газах: динамики их формирования, кинетических процессов и спектров оптического излучения. Обсуждаются условия, выполнение которых позволяет предотвратить переход объемного однородного разряда в контрагированный искровой разряд и создать однородный по диаметру разрядного промежутка сильноточный диффузный разряд. В диссертации экспериментально показано, что при большой величине запасенной энергии $CU^2/2 \geq 1$ Дж и значительных перенапряжениях объемный разряд в гелии преобразуется в сильноточный диффузный разряд с удельной мощностью $\sim 10^6$ Вт/см³, плотностью тока $\sim 10^2-10^3$ А/см², концентрацией электронов $\sim 10^{16}$ см⁻³ и температурой $\sim 1-2$ эВ. Основным механизмом ионизации диссертантом полагается ступенчатая ионизация, а механизмом гибели электронов - диссоциативная рекомбинация.

В пятой главе, в рамках сферически симметричной модели СДР получены аналитические выражения, позволяющие проводить расчет радиуса плазмы катодного пятна и скорости его расширения, результаты которого удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты и выводы работы.

Замечания к диссертационной работе

1. Из рис. 3.2.2 (б) и из сопровождающего его текста (стр. 74-75) неясно, каким значениям времени развития разряда соответствуют пространственно-временные картины, обозначенные как 1, 2, 3, 4 и 5.
2. Как следует из рис. 4.3.3, при $U > 10$ кВ интенсивность атомарных линий 587,6, 508,5 и 728 нм весьма резко возрастает с увеличением прикладываемого к промежутку напряжения U , примерно так же, как

интенсивности линий атома гелия 471, 501.6, 668 нм. В диссертации не указывается, что дают результаты сопоставления различного характера зависимостей интенсивностей излучения этих двух «групп» длин волн от напряжения горения разряда для понимания процессов на катоде и в прикатодной области.

3. На стр. 113 приводится фраза: «Температура катодного пятна, оцененная по относительной интенсивности спектральных линий материала катода, составляет 1-2 эВ». То есть, температура поверхности железного катода достигала 23 тыс. градусов?!... Может быть, речь идет о температуре электронов?
4. Сделанное диссертантом предположение о роли эмиссии в появлении в объеме разрядной камеры атомов материала катода (железа) желателно подкрепить экспериментальными данными. Неясно также, о какой эмиссии идет речь.
5. Как в модели разряда (§ 3.4) учитываются микронеоднородности на катоде?
6. В тексте диссертации и в подписях к рисункам встречаются описки и жаргонные и по существу некорректные выражения. Например, в подписях к рис. 4.1.2 и 4.1.3 вместо слова «мощность» написано «скорость энерговыклада»; по тексту диссертации «гуляет» выражение «прикладываемое поле», вместо «напряженность электрического поля».

Однако, приведенные выше замечания носят частный характер, не снижают значимости и ценности полученных диссертантом результатов и не влияют на общую положительную оценку работы.

Диссертационная работа Али Рафид Аббас Али «Нелокальные ионизационные и волновые процессы в импульсных разрядах атмосферного давления» является законченной научно-исследовательской квалификационной работой, в которой проведены серьезные экспериментальные и теоретические исследования процессов в импульсных наносекундных 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»** удовлетворяет требованиям, установленным п. 9 «Положения о присуждения учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Али Рафид Аббас Али заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника».

Официальный оппонент

доцент, доктор технических наук,

профессор кафедры светотехники Попов Олег Алексеевич

popovoleg445@yahoo.com. 8-905-795-9283



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский университет «МЭИ». 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная 14.
+7-495-362-7560. e-mail: universe@mpei.ac.ru

Подпись профессора кафедры светотехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Национальный исследовательский университет «МЭИ», доктора технических наук, доцента Попова Олега Алексеевича удостоверяю,

