

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертацию **Белоплотова Дмитрия Викторовича**

«Оптическое излучение плазмы высоковольтных наносекундных разрядов, формируемых в неоднородном электрическом поле в условиях генерации убегающих электронов», на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика»

Актуальность работы. Одним из способов формирования плотной неравновесной низкотемпературной плазмы является объемный импульсный разряд с внешней предыонизацией. Альтернативным способом создания плотной диффузной неравновесной низкотемпературной плазмы является высоковольтный наносекундный разряд, инициируемый убегающими электронами, исследования которого успешно выполняются в ИСЭ СО РАН под началом профессора Тарасенко В.Ф.

Особенностью самостоятельного разряда данного типа является возможность создания стабильной диффузной плазмы при высоких давлениях атомарных и молекулярных газов (в том числе и тяжелых инертных газов), а также их смесей. Исследованию способов и условий формирования, режимов и характеристик горения высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами посвящено много работ. Однако свойства такой плазмы, формируемой при возбуждении плотных газов убегающими электронами, изучены явно недостаточно. Поэтому работа Белоплотова Дмитрия Викторовича, направленная на изучение амплитудно-временных характеристик и спектрального состава излучения плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами безусловно актуальной. Несомненно интересным представляется новый подход к изучению плазмы с использованием принципиально новых методов исследований, основанных на визуализации потоков.

В связи с изложенным работа Белоплотова Д. В., посвященная установлению общих закономерностей об амплитудно-временных характеристиках и спектральном составе излучения плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в условиях образования паров материала электродов при различных режимах, а также данных о динамике развития ионизационных процессов в предпробойной стадии длительностью ~ 1 нс является безусловно актуальной.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 142 страницы. В работе насчитывается 72 рисунка, 5 таблиц и 107 библиографических наименований.

Содержание диссертации. Во введении показана актуальность направления исследований и степень разработанности, обозначены цель и задачи исследования, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, показана достоверность результатов исследований, а также их новизна, научная ценность и практическая значимость.

В первой главе приводятся общие сведения о газовых разрядах, механизмах электрического пробоя газовой среды, в том числе в условиях генерации убегающих электронов. Представлен обстоятельный обзор известных публикаций, посвящённых исследованиям наносекундного и субнаносекундного пробоя в газах оптическими методами и исследованиям свойств оптического излучения плазмы наносекундного разряда в различных режимах горения разряда (коронный, диффузный, искровой).

Во второй главе приводится описание экспериментальных стендов, характеристики регистрирующей аппаратуры, методов измерения напряжения, тока разряда и убегающих электронов, амплитудно-временных и спектральных характеристик излучения плазмы разряда.

В данной главе также подробно приводятся оценки точности измерений физических величин и пространственного разрешения оптической схемы, применённой для регистрации излучения плазмы разряда.

В третьей главе диссертации посредством рассмотрения уравнения баланса для населённости $C^3\Pi_u$ -состояния молекулы азота устанавливается связь между интенсивностью излучения молекул азота на полосах $C^3\Pi_u-B^3\Pi_g$ -перехода и приведённой напряжённостью электрического поля. Приводятся результаты измерений электрических и оптических параметров наносекундного разряда в азоте и азотосодержащих смесях в моноимпульсном режиме. Используя полученную связь между интенсивностью излучения молекул азота на полосах $C^3\Pi_u-B^3\Pi_g$ -перехода и приведённой напряжённостью электрического поля, устанавливается динамика напряжённости электрического поля в газоразрядном промежутке на стадии запаздывания его пробоя и делаются выводы о динамике развития ионизационных процессов в нём. Полученные данные сравниваются с данными из работы под номером 99 списка литературы диссертации, в которой представлены результаты численного моделирования наносекундного разряда в подобных условиях.

В четвертой главе диссертации представлены результаты исследований оптического излучения плазмы импульсно-периодического наносекундного разряда в условиях образования паров материала электродов при диффузном и контрагированном режимах горения разряда. Установлены причины образования паров материала электродов при импульсно-периодическом наносекундном разряде. Обнаружено, что при наносекундном разряде в этих условиях образуются высокодисперсные порошки. Экспериментально исследованы амплитудно-временные и спектральные характеристики излучения плазмы импульсно-периодического разряда в условиях образования паров материала электродов. Установлены особенности распределения интенсивности излучения молекул азота на полосах $C^3\Pi_u-B^3\Pi_g$ -перехода при импульсно-периодическом наносекундном разряде в промежутке «острие-плоскость», а также особенности распределения температуры газа в нём. Также в данной главе диссертации описываются условия, в которых за счёт возбуждения длительной люминесценции атомов меди обеспечивается визуализация процесса выноса продуктов плазмы разряда на периферию, и представлены результаты экспериментов по визуализации данных процессов с помощью теневой методики.

В диссертации сформулированы следующие защищаемые положения, на анализе которых я останавлиюсь.

1. В условиях формирования диффузного разряда в промежутке длиной d с неоднородным распределением напряжённости электрического поля, заполненного азотом либо азотосодержащей смесью, при подаче на него импульсов напряжения с субнаносекундной либо наносекундной длительностью фронта средняя скорость v фронта волн ионизации находима из выражения

$$v = \frac{d}{|t_{A_{\text{макс}}} - t_{A_{\text{анод}}}|}$$

$$A(t) = N_e(t) \cdot \left[k_{\text{и}} \left(\frac{E(t)}{N_0} \right) \cdot N_0 \cdot k_{\text{в}} \left(\frac{E(t)}{N_0} \right) + \frac{dk_{\text{в}} \left(\frac{E(t)}{N_0} \right)}{dt} \right] = \frac{1}{\Psi \cdot N_0} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{I(t)}{\tau_{\text{эфф}}} + \frac{dI(t)}{dt} \right)$$

где $t_{A_{\text{макс}}}$ и $t_{A_{\text{анод}}}$ – момент достижения первого максимума $A(t)$ вблизи анода и катода, соответственно; $N_e(t)$ – концентрация электронов; $k_{\text{и}}(E(t)/N_0)$ – константа скорости ионизации; $k_{\text{в}}(E(t)/N_0)$ – константа скорости возбуждения; $E(t)$ – напряжённость электрического поля; N_0 – концентрация молекул азота; Ψ – константа; $I(t)$ – интенсивность излучения полос перехода $C^3\Pi_u-B^3\Pi_g$ молекулы азота; $\tau_{\text{эфф}}$ – эффективное время жизни молекул азота в $C^3\Pi_u$ -состоянии.

$$N_e(t)$$

При этом должно выполняться условие: $N_2(t)$ – неубывающая функция в предпробойной стадии разряда.

Первое защищаемое положение основано на установленной математической связи между интенсивностью излучения молекул азота на полосах $C^3\Pi_u-B^3\Pi_g$ -перехода и приведённой напряжённостью электрического поля посредством рассмотрения уравнения баланса для населённости $C^3\Pi_u$ -состояния молекулы азота. Данная связь позволяет определить скорости волн ионизации и динамику процесса ионизации газа в промежутке в целом, используя экспериментальные данные о временном ходе интенсивности излучения молекул азота на полосах $C^3\Pi_u-B^3\Pi_g$ -перехода, возбуждаемого в предпробойной стадии наносекундного разряда. Показано качественное совпадение получаемых данным методом результатов с результатами численного моделирования наносекундного разряда в подобных условиях.

2. В условиях диффузного наносекундного импульсно-периодического разряда, инициируемого убегающими электронами, в промежутке типа «остриё–плоскость» при отсутствии согласования импедансов нагрузки и генератора образуются пары материала электродов с последующим возбуждением люминесценции на переходах атомов и ионов металлов, с сохранением морфологии и параметров диффузного разряда. При этом наносекундный импульсно-периодический разряд в данном режиме является источником высокодисперсных порошков.

Второе защищаемое положение основано на результатах прямых экспериментальных измерений спектральных и амплитудно-временных характеристик излучения плазмы наносекундного разряда в импульсно-периодическом режиме при отсутствии и наличии согласования импедансов нагрузки (газоразрядный промежуток) и генератора, а также на результатах микроскопии.

3. При наносекундном импульсно-периодическом разряде, инициируемом убегающими электронами, в промежутке типа «остриё–плоскость» длиной 2 мм, заполненном азотом при давлении 100–200 Торр, интенсивность излучения полос 2^+ -системы азота в центральной части промежутка в два и более раз выше, чем в приэлектродных областях. При этом температура газа в центральной части промежутка в 2–4 раза меньше, чем в приэлектродных областях.

Третье защищаемое положение основано на результатах прямых экспериментальных измерений спектральных характеристик излучения плазмы наносекундного разряда в импульсно-периодическом режиме, а также на результатах измерения температуры газа спектральным методом, применимость которого доказана в работах предшественников.

4. Визуализация газодинамических потоков при наносекундном импульсно-периодическом разряде, инициируемом убегающими электронами, в промежутке типа «остриё–плоскость», заполненном воздухом либо азотом, осуществима посредством возбуждения люминесценции атомов меди, образующихся в результате взрыва микронеоднородностей на поверхности электродов, на переходах $3d^{10}4d-3d^{10}4p$, $3d^{10}4p-3d^94s^2$ и $3d^{10}4p-3d^{10}4s$ за счёт резонансной передачи энергии с метастабильного $A^2\Pi_u^+$ -состояния молекулы азота на уровень $3d^{10}4d$ атома меди.

Четвёртое защищаемое положение основано на результатах прямых экспериментальных измерений амплитудно-временных характеристик излучения плазмы наносекундного импульсно-периодического разряда в воздухе и азоте в условиях образования паров электродов из меди, а также на результатах эксперимента по визуализации газодинамических процессов в разряде теневой методикой.

Имеются замечания по работе:

1. Непонятно, зачем в защищаемом положении приведена формула, которая не связана прямо с этим положением в представленном виде.

2. На стр. 77 сказано: «Амплитуда тока пучка убегающих электронов зависит от числа импульсов, не меняется с ростом их числа выше 10-15 импульсов». Почему? Нет достаточного анализа причин этого процесса.

3. На стр 8: «При этом наносекундный импульсно-периодический разряд в данном режиме является источником высокодисперсных порошков». Разряд не является источником порошков, разряд инициирует образование порошков.

4. Зачем приведен в диссертации рис. 3.3 (стр.82) и даже в автореферате (рис.3)? Это же просто расчет по простой известной из [63] формулы, там же экспериментально проверенной. Что дает этот рисунок нового для понимания результатов исследований?

5. Почему нельзя синхронизовать лазер с генератором? Это же принципиально нужно!

6. Встречаются неудачно сформулированные фразы, ошибки в написании, много опечаток:

- На стр.10: «Возбуждение люминесценции материала электродов при диффузном наносекундном импульсно-периодическом разряде... проводить спектральные исследования строения материалов и соединений». Строение не определить, а вот состав можно.

- На стр. 70, 75 «... лавсановго...», «...леночных...»

- Что такое «...как минимум неубывающая...» функция? (стр 84).

Достоверность полученных результатов работы и выводов обеспечивается использованием различных диагностических методов при проведении экспериментов, согласием с имеющимися данными других авторов, обоснованностью использованных теоретических зависимостей, допущений и ограничений, корректностью поставленных задач и согласованностью результатов теоретических исследований с экспериментальными данными.

Следует отметить тщательность автора диссертации в обосновании выбора методов экспериментальных исследований для решения поставленных задач, четком указании границ применения использованных методов, точности и ошибок измерений.

Научная ценность работы заключается в том, что

- предложенный оптический метод исследования динамики развития ионизационных процессов при пробое газовых промежутков наносекундными импульсами напряжения позволяет глубже изучить явление электрического пробоя газа в условиях генерации убегающих электронов.

- определены условия, в которых при импульсно-периодическом наносекундном разряде в диффузном режиме наблюдаются образование и люминесценция паров материала электродов, что позволяет проводить спектральные исследования состава материалов.

- установлены особенности распределения интенсивности излучения молекул азота на полосах $C^3P_u - B^3P_g$ -перехода, возбуждаемого при наносекундном импульсно-периодическом разряде в неоднородном электрическом поле в условиях неоднородного нагрева газа.

- показана возможность экспериментального исследования распределения потоков продуктов плазмы импульсно-периодического наносекундного разряда в азотосодержащих смесях в условиях образования и люминесценции атомов меди, возбуждаемых при резонансной передачи энергии от молекул азота, находящихся в метастабильном состоянии.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

- предложенный оптический метод исследования ионизационных процессов применим для экспериментального исследования электрического пробоя газонаполненных промежутков длиной ~ 1 см и при характерной длительности предпробойной стадии разряда ~ 1 нс.

Работа хорошо апробирована. Ее основные результаты докладывались на 6 международных и всероссийских научных конференциях, опубликованы в 16 работах, в том числе в 11 входящих в число рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертационных работ или опубликованных за рубежом.

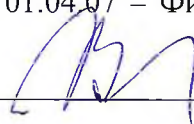
Автореферат диссертации соответствует содержанию и структуре диссертации и адекватно отражает полученные в работе результаты.

Изложенные выше замечания по работе не снижают ценности полученных соискателем результатов и значимости диссертационной работы в целом.

С учётом сказанного выше считаю, что диссертация Белоплотова Дмитрия Викторовича «ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ РАЗРЯДОВ, ФОРМИРУЕМЫХ В НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ В УСЛОВИЯХ ГЕНЕРАЦИИ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ» является законченной научно-исследовательской работой, удовлетворяющей требованиям пункта 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика.

Официальный оппонент:

профессор кафедры лазерной и световой техники Института физики высоких технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика твердого тела, профессор, заслуженный деятель науки РФ



Лисицын Виктор Михайлович

5 декабря 2016 г.

Подпись официального оппонента Лисицына В.М. заверяю:

Ученый секретарь ученого совета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»



Ананьева Ольга Афанасьевна

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел. +7(3822)606-333,
E-mail: tpu@tpu.ru,
сайт: www.tpu.ru