

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
Федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения Высшего

профессионального образования
«Санкт-Петербургский
государственный университет»
д.х.н., профессор



С. П. Туник

«19» мая 2014 г.

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертационную работу Пинаева Вадима Александрович «Исследование электрических и спектральных характеристик тлеющего разряда низкого давления в продольном магнитном поле», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Актуальность темы диссертации.

Диссертационная работа Пинаева В.А. посвящена практически важной и актуальной задаче - изучению влияния магнитного поля на тлеющий разряд низкого давления. Наложение магнитного поля на тлеющий разряд приводит к существенному изменению основных процессов, отвечающих за баланс заряженных частиц в плазме разряда. Главный канал гибели заряженных частиц – рекомбинация на стенке вследствие амбиполярной диффузии – становится практически не существенным, уступая свою роль объёмной рекомбинации. В этом случае, плотность и температура заряженных частиц возрастают, что может иметь непосредственное практическое применение в ряде технологических процессов, связанных с применением тлеющего разряда (модификация поверхности материалов).

Помимо прикладного аспекта, исследование тлеющего разряда имеет и фундаментальное значение. В работе ставится вопрос о формировании непрерывного спектра излучения в области отрицательного свечения тлеющего разряда. Особенностью данной области тлеющего разряда является наличие сильного нелокального энергетического спектра электронов, где помимо большинства электронов с энергией $\sim 1\text{эВ}$ наблюдается присутствие групп быстрых электронов с энергией вплоть до потенциала катодного падения, что необходимо учитывать при вычислении интенсивности непрерывного спектра. Поскольку, в настоящее время, прямое измерение функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) является сложной и

трудоёмкой задачей, в литературе имеется крайне ограниченное число работ, посвящённых этой проблеме. Для оценки вида высокоэнергетичной компоненты ФРЭЭ в диссертационной работе используется метод статистического моделирования релаксации пучка быстрых электронов в катодных областях разряда.

Из сказанного выше можно сделать вывод о том, что выбранное направление исследований является актуальным, а полученные результаты имеют перспективы применения на практике.

Краткий анализ содержания работы.

Диссертация состоит из введения четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Во введении представлены соображения автора по актуальности работы, сформулированы цели диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна результатов и их практическая ценность, изложены аргументы, указывающие на достоверность результатов. Также описан личный вклад соискателя в получение результатов диссертации, представлен список публикаций по теме диссертации и изложено содержание работы.

Первая глава содержит краткий обзор работ, имеющих отношение к поставленной теме диссертации, отражающий современное состояние исследования тлеющего разряда. Приведены экспериментальные данные о влиянии магнитного поля на тлеющий разряд, результаты по измерению функции распределения электронов по энергиям в области отрицательного свечения тлеющего разряда. Основное внимание уделено работам по исследованию непрерывного спектра излучения тлеющего разряда.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки и используемых в работе методов диагностики плазмы тлеющего разряда. Выполнено описание схемы калибровки оптической системы для измерения абсолютной величины интенсивности излучения тлеющего разряда в видимой области спектра. Для диагностики плазмы тлеющего разряда низкого давления в магнитном поле используется метод двух зондов. Приводится описание используемого способа определения температуры и концентрации электронов двухзондовым методом, указана погрешность используемых методов.

В третьей главе представлены полученные результаты о влиянии магнитного поля на электрические характеристики тлеющего разряда. Приводятся экспериментальные результаты о зависимости напряжения и потенциала стенки разряда в зависимости от давления и прикладываемого магнитного поля; распределение температуры и концентрации электронов по длине разряда. В параграфе 3.3 приводится модель энергетической релаксации пучка быстрых электронов, поступающих из катодного слоя в область отрицательного свечения разряда. Показано, что с понижением давления помимо энергетической релаксации пучка следует учитывать потери электронов, связанные с их попаданием на стенку камеры. Предложена модель расчёта функции распределения электронов пучка по энергиям

(ФРЭПЭ) по длине разряда с учётом рекомбинационных потерь на стенке. Полученные результаты моделирования качественно описывают экспериментальные данные по зависимости длины отрицательного свечения и имеют неплохое согласие с существующими в литературе результатами по измерению функции распределения пучка по энергиям.

Четвёртая глава содержит результаты, касающиеся излучения тлеющего разряда в магнитном поле, приведены спектры излучения разряда. На основе анализа процессов, способных давать вклад в формирование непрерывного спектра излучения тлеющего разряда, сделана попытка рассчитать его интенсивность. Показано, что главным процессом при исследованных степенях ионизации является тормозное излучение, возникающее вследствие рассеяния электронов на нейтральных частицах. На основе зондовых измерений температуры и концентрации электронов основной группы выполнен расчёт непрерывного спектра в предположении, что ФРЭЭ является максвелловской. Показано, что для исследуемых давлений тлеющего разряда в гелии, водороде, неоне экспериментально измеренные значения интенсивности непрерывного спектра существенно превосходят расчётные значения. Вклад нелокальной части функции распределения электронов рассмотрен в параграфе 4.4. Для объяснения полученного результата в параграфе 4.4 рассматривается влияние нелокальности электронного спектра на интенсивность излучения непрерывного спектра. Варьируя плотность и среднюю энергию электронов вторичной группы и пучка, соискатель показал, что без магнитного поля вклад данных двух групп может превышать вклад основной группы, а в случае присутствия магнитного поля сравним с основной группой электронов. В конце главы представлены результаты измерения спектра излучения в области положительного столба. Расчёт интенсивности непрерывного спектра в пределах погрешности совпадает с измеренным значением.

В заключении диссертации перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Научная новизна полученных результатов.

Новизна результатов диссертационной работы В. А. Пинаева связана с выбором неисследованных ранее режимов горения тлеющего разряда в магнитном поле. Получены новые экспериментальные результаты электрических и спектральных характеристик тлеющего разряда низкого давления в магнитном поле до 1.4 кГс.

Постановка задачи о релаксации быстрых электронов в области отрицательного свечения с учётом рекомбинации электронов пучка на стенке по длине разряда позволила качественно объяснить полученный автором результат несовпадения длины отрицательного свечения с длиной энергетической релаксации быстрых электронов при низком давлении разряда. В качестве основного источника, приводящего к попаданию электронов на стенку, предлагается рассеяние при упругом столкновении с нейтральными частицами.

Экспериментально впервые показано, что непрерывный спектр

излучения области отрицательного свечения тлеющего разряда не определяется тормозным излучением основной группой электронов. Сделанная попытка оценки вклада вторичных электронов и пучка в формирование непрерывного спектра излучения показывает, что вероятной группой, которая вносит основной вклад, являются электроны с энергией, близкой к энергии излучаемых квантов. Вклад пучка электронов, хотя и может быть сравним с основной группой электронов, обычно является несущественным по сравнению с измеренной интенсивностью непрерывного спектра.

Достоверность результатов и выводов

Использование стандартных методов диагностики плазмы, анализ погрешностей и сопоставление полученных результатов с результатами других авторов, позволяют судить о надежности и правильности сделанных в диссертации выводов.

Достоверность расчётных результатов подтверждается использованием широко применяемого метода прямого статистического моделирования и согласием полученных результатов с аналитическими решениями и имеющимися экспериментальными данными.

Практическая и научная значимость.

Полученные в диссертации Пинаева В.А. результаты могут быть использованы в ряде технологических процессов, связанных с модификацией поверхности материалов (азотирование, нанесение плёнок и технологичных покрытий), а также при создании новых типов источников света, работающих на основе тлеющего разряда.

Результаты прямого статистического моделирования ФРЭПЭ в области отрицательного свечения могут быть использованы в гибридных моделях при вычислении полного вида ФРЭЭ.

Замечания к диссертации.

1) При оценке интенсивности излучения пучка не учтено то, что при энергиях 1-2 кэВ электроны имеют существенно анизотропное дифференциальное сечение углового рассеяния. В этом случае транспортная частота столкновений должна отличаться от частоты упругих столкновений.

2) Полученные в работе результаты моделирования ФРЭПЭ в области отрицательного свечения не сравниваются с результатами других авторов. Такие исследования уже проводились, для примера можно привести работу: J.P. Voeuf, J. Phys. D: Appl. Phys., **15** (1982) 2169-2187.

3) Используемые в диссертации выражения для оценки температуры электронов (например, (1.3)) получены в предположении упругого баланса энергий электронов. Однако в разрядах низкого давления доминируют потери при неупругих столкновениях и зависимость будет другой.

4) Определение температуры электронов двузондовым методом по формулам (2.13, 2.14) на стр. 51 предполагают максвелловское распределение электронов, что неочевидно для исследуемых условий.

5) Смысл фразы на стр.65 «В этом случае, момент образования ПС может быть найден из условия стационарности плазмы TP» непонятен, как и

представленная ниже на стр. 65 формула выполнения условия стационарности через некий параметр α .

6) На стр. 53 при обсуждении на рис.3.8. увеличения абсолютных значений температуры и концентрации электронов указано, что в магнитном поле «потери энергии электронов становятся не существенными». Это утверждение требует обоснования.

7) Вызывает сомнение то, что параметр η (4.1) для данных рис.4.7 (гелий, давление 40 Па, $n_e \approx 310^{10} \text{ cm}^{-3}$, $T_e \approx 2 \text{ эВ}$) составляет величину, большую 10.

8) В формуле (4.12) на стр. 92 использовано неверное выражение для дрейфовой скорости электронов.

Заключение по работе.

В целом диссертация В.А. Пинаева является законченным научным исследованием на актуальную тему. Последовательность изложения соответствует логике научного поиска.

Автореферат полностью отражает основное содержание текста диссертации. Сделанные выше замечания не умаляют ценности и значимости выполненной работы.

Диссертационная работа соответствует требованиям Положения ВАК РФ о присуждении ученых степеней, а ее автор, Пинаев Вадим Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв обсуждён и одобрен на заседании лаборатории физики плазмы кафедры оптики СПбГУ.

Доцент,
к.ф.-м.н.

А. А. Кудрявцев

Заведующий кафедрой оптики СПбГУ,
профессор, д.ф.-м.н.

Н. А. Тимофеев

Учёный секретарь кафедры оптики СПбГУ,
профессор, д.ф.-м.н.

А. А. Митюрева

ПОДПИСЬ РУКИ
ЗАВЕРЯЮ. НАЧАЛЬНИК
ОТДЕЛА КАДРОВ
Н. А. ГОРИНОВА

А. А. Кудрявцев
16.05.14

ПОДПИСЬ РУКИ
ЗАВЕРЯЮ. НАЧАЛЬНИК
ОТДЕЛА КАДРОВ
Н. А. ГОРИНОВА

А. А. Митюрева
16.05.14

ПОДПИСЬ РУКИ
ЗАВЕРЯЮ. НАЧАЛЬНИК
ОТДЕЛА КАДРОВ
Н. А. ГОРИНОВА



А. А. Митюрева