

На правах рукописи

Платонов

Платонов Алексей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДА
В СКРЕЩЕННЫХ ПОЛЯХ В ГЕЛИИ**

Специальность: 01.04.04 — физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Петрозаводск

2007

Работа выполнена на кафедре экспериментальной и общей физики
физико-математического факультета
Карельского государственного педагогического университета

Научный профессор, кандидат физико-математических
руководитель: наук, Вагнер С.Д.
Официальные профессор, доктор физико-математических наук
оппоненты: Смирнов А.С.
профессор, доктор физико-математических наук
Сысун В.И.
Ведущая Санкт-Петербургский государственный универ-
организация: ситет

Защита диссертации состоится «18» мая 2007 г. в
14 часов на заседании диссертационного совета К 212.190.01
при Петрозаводском государственном университете по адресу:
Петрозаводск, пр. Ленина, 33.

Отзывы направлять по адресу:
185640, Петрозаводск, пр. Ленина, 33, ПетрГУ, ученому секретарю
диссертационного совета К 212.190.01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПетрГУ.

Автореферат разослан «17» апреля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 212.190.01
доктор физико-математических наук,
профессор


Фофанов А.Д.

Кер-А
3096

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Из приведенного краткого обзора литературы (в который включены в основном работы, выполненные за последние двадцать лет) следует, что до сих пор нет достаточных экспериментальных данных, образующих единую картину разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях цилиндрической геометрии. Не было простой и понятной, и в то же время достоверной кинетической модели на основе представлений о нелокальной кинетике электронов плазмы разряда в скрещенных полях данной конфигурации. Нет четкого описания основных областей такого разряда (приэлектродных слоев и плазменных областей). Наиболее простая ситуация имеет место в разрядах с замкнутым холловским дрейфом электронов. Так как в цилиндрической геометрии дивергенция холловского тока равна нулю, то этот дрейф не приводит к перераспределению частиц, так что проблема становится двумерной и проще для изучения. В последние годы интерес к физике разряда в скрещенных полях сильно возрос. Одной из причин этого является широкое использование такого типа разряда в технологии создания тонких пленок. Возможность рассмотрения процессов, происходящих в разряде в скрещенных полях на основе обобщения нелокальной кинетической теории, развитой ранее для тлеющего разряда без магнитного поля, является другой важной причиной интереса к разряду в скрещенных полях.

Поэтому комплексное изучение физических свойств разряда в скрещенных полях и создание соответствующей модели актуальны.

Цель работы заключалась в экспериментальном исследовании различных физических характеристик разряда постоянного тока в скрещенных электрическом и магнитном полях в гелии с цилиндрической геометрией электродов, установлении его структуры и построении теоретической модели разряда с учетом нелокальной кинетики электронов.

Научная новизна работы определяется тем, что в ней:

- На примере разряда в гелии показано, что сценарий разряда, состоящий в разделении его на плазму и слой объемного за-

РОС. НАЦИОНАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА
С.-Петербург
09 2007-дкт 369

ряда и в формирование области обратного поля в фарадеевом темном пространстве, развитый для разряда без магнитного поля, может быть обобщен на случай разряда в скрещенных полях с замкнутым холловским током электронов. В результате комплексного исследования установлено, что функция распределения электронов (ФРЭ) разделяется на три части, соответствующие быстрым электронам, электронам, запертым в потенциальной яме, и промежуточным электронам, энергии которых ниже первого потенциала возбуждения.

- Показано, что электронный ток в фарадеевом темном пространстве переносят промежуточные электроны; измеренные ФРЭ промежуточных электронов соответствуют диффузии при постоянной полной энергии с нулевым граничным условием на аноде.
- Исследования проведены в двух разрядных трубках с различным разрядным промежутком и при различных полярностях внутреннего и внешнего электродов.
- Выполнено комплексное исследование прианодной области разряда в скрещенных полях. Обнаружено, что наложение магнитного поля меняет знак анодного падения и приводит к перестройке распределения потенциала и ФРЭ.
- В разряде в скрещенных полях с графитовыми электродами получены алмазоподобные пленки, подтверждающие однородность разряда.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Развитие нелокальной модели короткого тлеющего разряда к разряду в магнитном поле.
2. Выяснение роли различных групп электронов в формировании катодного слоя и плазмы, отрицательного свечения и фарадеева темного пространства в разряде в скрещенных полях.
3. Результаты экспериментальных исследований функции распределения электронов в разряде магнетронного типа, распределения потенциала, а также пространственное распределение интенсивностей различных линий атомарного спектра при различных полярностях электродов.
4. Результаты экспериментальных исследований функции распределения и распределения потенциала в анодной области

- (удаленной от катода) тлеющего разряда при наличии магнитного поля, скрещенного с электрическим полем у анода.
5. Анализ результатов экспериментальных исследований на основе теории нелокальной кинетики электронов, развитой для разряда в магнитном поле.
 6. Образование алмазоподобных пленок с высокой степенью центральной симметрии в разряде в скрещенных полях.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были доложены на конференции по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-2004, Петрозаводск, Россия, 2004; I Всероссийской конференции молодых ученых 26–29 апреля 2005, г. Томск, Россия; V International Conference Plasma Physics and Plasma Technology PPPT-5, Minsk, Belarus, 2006.

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликованы две статьи в рецензируемых журналах, пять статей в сборниках докладов конференций и два научных отчета.

Личный вклад автора

Основные результаты работы, их обработка и интерпретация получены самим автором либо при его непосредственном участии. Анализ результатов, их обобщение и интерпретация выполнены в соавторстве. Электронографические исследования пленок проведены В. В. Ковалевским (Институт геологии Карельского НЦ РАН).

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из 5 разделов, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 93 с., включая 53 рисунка, 3 таблицы и 70 наименований библиографических ссылок.

Благодарности

Исследования, описанные в данной работе, выполнялись в рамках программ «Фундаментальные исследования и высшее образование» и «Развитие научного потенциала высшей школы», поддержанных Министерством образования и науки РФ и Американским фондом гражданских исследований и развития (CRDF). Гранты: РФФИ 03–02–16460, Министерства образования E03–3.2–256, CRDF PZ-013–02

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава первая содержит обзор литературных данных, отражающих степень изученности проблем, затронутых в диссертации. Часть обзора посвящена работам по исследованию структуры и свойств классического тлеющего разряда. Основное внимание уделено теоретическим и экспериментальным работам по разряду в скрещенных электрическом и магнитном полях, разряду магнетронного типа. Рассмотрены результаты электрических и оптических исследований данного типа разряда, а также немногочисленные попытки моделирования разряда в скрещенных полях. Подавляющая часть работ посвящена изучению пробы в ячейке Пеннинга и в разряде магнетронного типа. Это обусловлено тем, что данный тип разряда использовался как измерительный инструмент и рассматривался как перспективный сильноточный модулятор. Изучению же свойств плазмы разряда в скрещенных полях было уделено недостаточно внимания. Немногочисленные работы [1, 2] были посвящены изучению основной характеристики плазменных областей разряда — функции распределения электронов (ФРЭ). Не было достаточных данных, образующих единую картину разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях цилиндрической геометрии. Отсутствовала простая, понятная и в то же время достоверная кинетическая модель на основе представлений о нелокальной кинетике электронов плазмы разряда в скрещенных полях данной конфигурации. Классификация основных областей такого разряда была основана на визуальных наблюдениях. Между тем физика разряда определяется в основном разделением его на приэлектродные области и квазинейтральную плазму.

Вторая глава посвящена рассмотрению экспериментальной методики исследования разряда. Описаны методы получения основных характеристик разряда. Подробно описаны установки, созданные для проведения электрических и оптических исследований разряда в скрещенных полях с цилиндрической конфигурацией электродов. Особое внимание уделяется методике измерения функции распределения электронов. Обоснованы выбранные методики исследования разряда и рассмотрены фак-

торы, способные исказить результаты измерений и затруднить их интерпретацию, а также способы снижения их влияния.

Третья глава посвящена описанию результатов электрических и оптических измерений в разряде постоянного тока в скрещенных электрическом и магнитном полях с замкнутым холловским током в гелии. Условия, при которых проводились измерения: давление газа 0,5 Торр, разрядный ток 50 мА, магнитное поле 15–60 мТл и напряжение на разрядном промежутке 300 В.

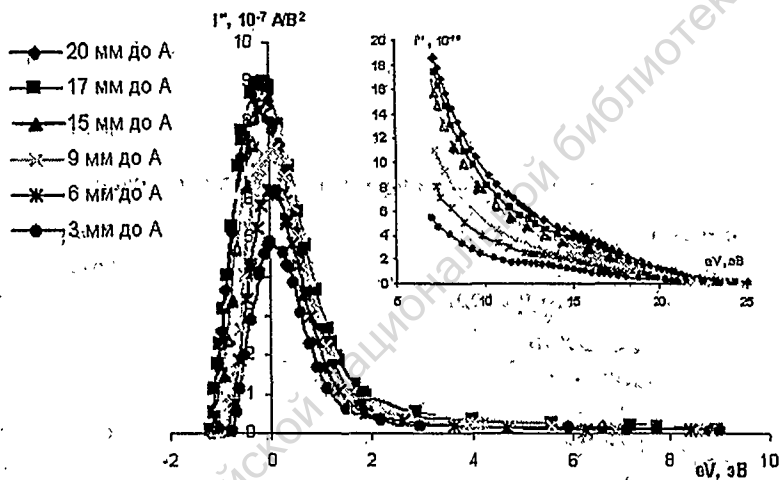


Рис. 1. Радиальная зависимость функции распределения электронов

На рисунке 1 приведены ФРЭ в различных точках разрядного промежутка. Основную часть ФРЭ образуют электроны с энергиями менее 2 эВ. Особенности ФРЭ являются обеднение ФРЭ при энергии около 20 эВ и избыток электронов с энергией около 15 эВ. Первая особенность связана с возбуждением нижних уровней атомов гелия. Вторая — обусловлена образованием молекулярных ионов, при котором возникают электроны с указанной энергией.

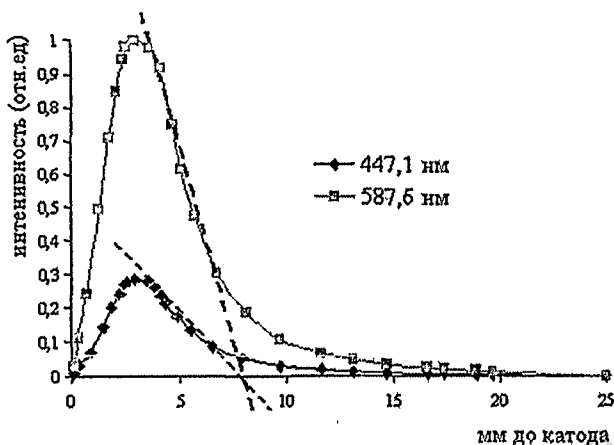


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения для отдельных линий

Кинетическая самосогласованная одномерная модель разряда в скрещенных полях была развита в соответствии с работой [3]. За ионизацию в прикатодной области ответственны быстрые электроны, ускоренные сильным электрическим полем в слое объемного заряда (эмиттированные катодом и родившиеся в слое). Энергия их намного превосходит энергии возбуждения и ионизации атомов, а поток их экспоненциально растет по мере удаления от катода, достигая максимума вблизи границы слоя и плазмы. Здесь же имеет место максимум интенсивности излучения (рис. 2). Из характера радиального распределения интенсивности излучения и электрического поля (рис. 3) следует, что разряд состоит из катодного слоя и квазинейтральной плазмы. Предположение о локальности ФРЭ соответствует обращению интенсивности излучения в ноль на границе слой-плазма. На самом же деле, в соответствии с нелокальной моделью для ФРЭ, интенсивность излучения возрастает по мере удаления от катода и максимальна вблизи границы слой-плазма. Плазменная область состоит из части отрицательного свечения и фарадеева темного пространства. Положение границы между отрицательным свечением и фарадеевым темным пространством определялась по экстраполяции спада излучения к нулю.

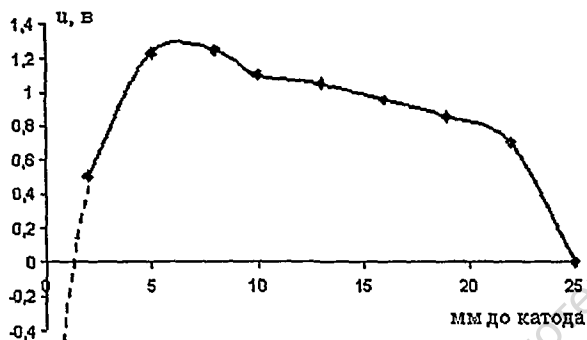


Рис. 3. Радиальное распределение потенциала

Использованные умеренные магнитные поля не влияют на движение ионов. В этом случае толщина слоя объемного заряда L_{Sh} , которая определяется ионами, не должна зависеть от напряженности магнитного поля. Длина же отрицательного свечения L_{NG} , которая определяется пробегом быстрых электронов, должна уменьшаться с ростом магнитного поля. Такие зависимости L_{NG} и L_{Sh} были обнаружены на эксперименте.

Электронные ветви зондовых характеристик соответствуют разделению ФРЭ на группу медленных электронов, запертых в потенциальной яме, и группу промежуточных электронов с энергиями менее первого потенциала возбуждения и выше максимума потенциала, который соответствует границе между отрицательным свечением и фарадеевым темным пространством или аноду. Измеренные ФРЭ промежуточных электронов соответствуют диффузии при постоянной полной энергии с нулевым граничным условием на аноде. Это означает, что электронный ток в фарадеевом темном пространстве переносится промежуточными электронами.

Так как доля быстрых электронов весьма мала, то зондовая методика малозффективна для их исследования. Информацию об этой части ФРЭ дает исследование излучения разряда. ФРЭ быстрых электронов существенно нелокальна и в плазменной части разряда, где электрическое поле практически отсутствует. Поэтому отрицательное свечение должно состоять из двух частей —

из слоя и из плазменной части, в которой поток быстрых электронов спадает, но ионизация и возбуждение, а значит, и свечение, обусловлены нелокальностью ФРЭ. Вытекающий из этого факт наличия интенсивного излучения в бесполовой области был обнаружен на эксперименте. Длина отрицательного свечения совпадает с пробегом самых быстрых электронов, эмиттированных катодом. Так как поток ионов, рождающийся в плазме, переносится на катод амбиполярной диффузией, то в плазме вблизи границы между катодным слоем и плазмой возникает большой градиент концентрации. Самосогласованное амбиполярное электрическое поле при этом должно подавлять электронный диффузионный ток как на анод, так и на катод. В результате образуется потенциальная яма для электронов. Запертые в этой яме электроны не участвуют в переносе тока и остывают до температуры порядка комнатной.

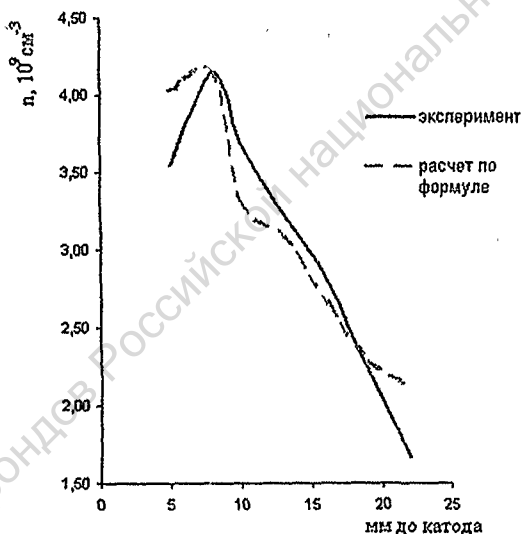


Рис. 4. Радиальное распределение концентрации электронов

Максимум электронной концентрации соответствует дну потенциальной ямы, и положение максимума близко к границе между отрицательным свечением и фарадеевым темным пространством. Так как концентрация плазмы в плазменной части

отрицательного свечения и в фарадеевом темном пространстве обусловлена в основном электронами, запертыми в потенциальной яме, то она описывается уравнением Больцмана (рис. 4):

$$n(r) = n_0 \exp \left[-\frac{e(\varphi - \varphi_0)}{kT} \right], \quad (1)$$

где n_0 — максимальная концентрация электронов, k — постоянная Больцмана, T — температура запертых электронов, e — заряд электрона, φ — потенциал относительно дна ямы.

Электронный ток в фарадеевом темном пространстве переносится промежуточными электронами, энергии которых меньше энергий возбуждения атомов газа, но превышают потенциал анода. Однако экспериментально этот факт никем не был подтвержден. Полная энергия промежуточных электронов на длине λ_e сохраняется. Если λ_e для них больше, чем межэлектродное расстояние L (как это было в условиях эксперимента), то они свободно достигают анода. В нелокальном режиме распределение промежуточных электронов $f_0(e, r)$ в фарадеевом темном пространстве удовлетворяет кинетическому уравнению Больцмана с нулевым граничным условием на аноде. Пренебрегая малой потерей энергии при упругих столкновениях, имеем:

$$\frac{1}{rv} \frac{\partial}{\partial r} rvD(v) \frac{\partial f_0}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

где v — скорость электронов, r — расстояние от центра разряда, $D = \frac{\lambda^2(v)v_e(v)}{3 \left(1 + \frac{\omega_e^2}{v_e^2(v)} \right)}$ — электронный коэффициент диффузии

поперек магнитного поля, λ — длина свободного пробега электронов, v_e — частота столкновений, ω_e — циклотронная частота. Производные берутся при постоянной полной энергии

$$\varepsilon = \frac{mv^2}{2} - e\varphi(r). \quad (3)$$

Решение уравнения (2) есть:

$$f_0(\varepsilon, r) = \Phi(\varepsilon) \int_r^{r_0} \frac{dr'}{v(r', \varepsilon) r' D(r', \varepsilon)} \cdot (4)$$

Функция источника $\Phi(\varepsilon)$ определяется кинетикой и релаксацией быстрых электронов.

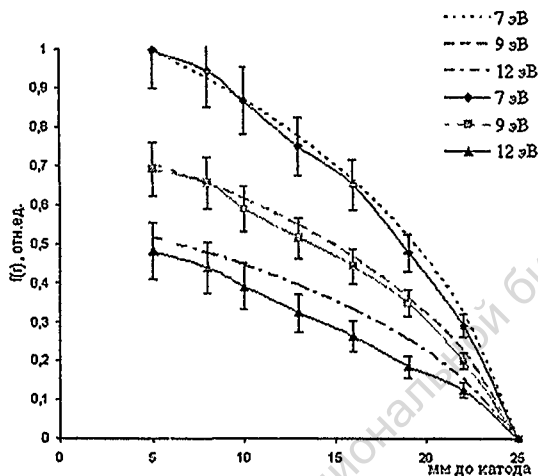


Рис. 5. Распределение ФРЭ по радиусу в разряде в скрещенных полях (пунктирные линии — расчет по формуле (4), сплошные линии — результат эксперимента)

Наблюдается хорошее согласие расчетов по формуле (4) с экспериментом. Подтверждается тот факт, что электронный ток в фарадеевом темном пространстве переносится промежуточными электронами.

Данные исследования проводились в двух разрядных трубках с различным разрядным промежутком и при различных полярностях внутреннего и внешнего электродов. Обнаружено, что для трубки с большим разрядным промежутком изменение полярности оказывает существенное влияние на распределение потенциала в разряде. Происходит изменение глубины потенциальной ямы. В трубке с малым разрядным промежутком, где площади электродов отличаются меньше, изменение полярности не оказывает существенного влияния на распределение потенциала. В этой трубке почти весь разрядный промежуток занят областью отрицательного свечения, а фарадеево темное пространство за-

нимает примерно 1 мм около анода. Наблюдается существенное различие в функциях распределения в области запертых электронов. В то же время в области быстрых электронов функции мало отличаются друг от друга с изменением полярности.

Таким образом, подтверждены основные положения развитой модели разряда в скрещенных полях с замкнутым холловским дрейфом и цилиндрической геометрией электродов, такие, как разделение на слой объемного заряда и плазму, формирование катодного падения и отрицательного свечения, возникновение области обратного электрического поля, создающего потенциальную яму для электронов малой энергии и приводящее к формированию фарадеева темного пространства, разделение функции распределения электронов (ФРЭ) на три ярко выраженные группы. Показано, что толщина слоя практически не зависит от магнитного поля, тогда как длина отрицательного свечения значительно уменьшается с ростом магнитного поля. Измеренная ФРЭ хорошо согласуется с развитой нелокальной моделью, согласно которой ток в фарадеевом темном пространстве переносится промежуточными электронами, которые не заперты в потенциальной яме, энергии которых меньше первого потенциала возбуждения.

Четвертая глава посвящена исследованию анодной области тлеющего разряда при наложении магнитного поля, скрещенного с электрическим полем у анода. При этом прианодные области разряда располагались на большом расстоянии от катода, что позволило исследовать параметры анодных областей разряда в скрещенных полях, исключив при этом влияние катода. Проведено исследование второй производной зондового тока (т. е. ФРЭ) и распределения потенциала.

Установлено, что медленная часть ФРЭ не сильно отличается от максвелловской. Это согласуется с тем обстоятельством, что в условиях эксперимента частота межэлектронных столкновений оказывается больше обратного времени их диффузионного ухода на анод. Без магнитного поля концентрация электронов спадает к аноду. Наложение магнитного поля сильно меняет характер ФРЭ и профиля потенциала. Формирование отрицательного анодного падения соответствует, по-видимому, тому случаю, когда диффузионный ток на анод больше полного, так что часть электронов

заперта и не участвует в переносе тока. При магнитном поле 5 мТл небольшое электрическое поле у анода обеспечивает вместе с диффузионным потоком необходимую величину разрядного тока.

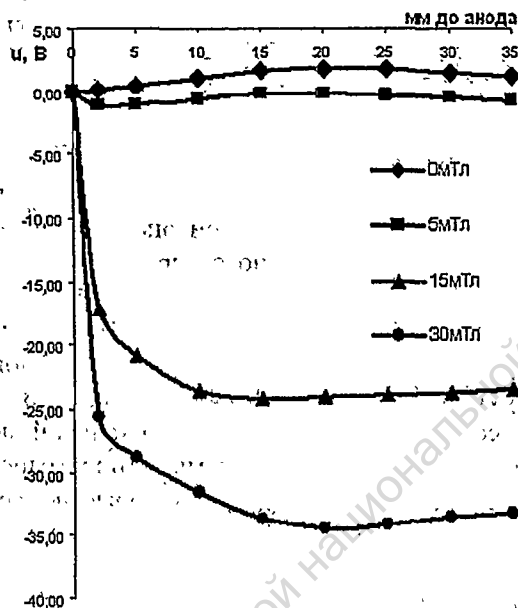


Рис. 6. Радиальное распределение потенциала при различных магнитных полях

Наложение даже небольшого магнитного поля подавляло диффузионный перенос электронов на анод. При этом анодное падение становится положительным и увеличивается с ростом магнитного поля, достигая значений, близких к потенциалу ионизации гелия. Это согласуется с тем фактом, что ионный поток у анода, необходимый для формирования плазмы, в этом случае должен формироваться в прианодном слое. Тот факт, что положительное анодное падение порядка потенциала ионизации в отсутствие магнитного поля, наблюдался в работе [4]. Повышение давления приводит к некоторому уменьшению средней энергии электронов. При давлении 1 Торр отрицательное анодное падение отсутствует. Аналогичное действие оказывает повышение тока.

Эти изменения одинаковым образом влияют на диффузию электронов на анод, что, в свою очередь, уменьшает отрицательное падение у анода и меняет его знак.

Следует отметить, что влияние магнитного поля на ФРЭ и распределение потенциала в прианодной области происходит при очень небольших магнитных полях (5 мТл), которым соответствует значение отношения $\omega/v \sim 1$. Принято считать [5], что такое магнитное поле не может оказать заметного влияния на движение электронов. Приведенные в диссертации экспериментальные данные говорят об обратном.

В данной главе также проведено сравнение полученных результатов с результатами, анализ которых проведен в главе три. Видно, что при одинаковых разрядных условиях распределения потенциала отличаются очень сильно. В отличие от разряда магнетронной конфигурации, удалось провести исследование в более широком интервале магнитных полей. При этом наложение более сильного магнитного поля меняет знак анодного падения с отрицательного на положительное. Кинетическое уравнение, которому удовлетворяет ФРЭ анодной области, совпадает с уравнением для электронов, переносящих ток в фарадеевом темном пространстве магнетронного разряда.

Глава пятая. Разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях является одним из методов формирования тонких алмазоподобных пленок, которые являются перспективным материалом для использования в различных областях техники. В пятой главе описан эксперимент по использованию разряда в неоне в скрещенных полях с магнетронной конфигурацией электродов для получения тонких пленок. Для исключения загрязнений была использована трубка, в которой оба электрода изготовлены из графита.

Первоначально были измерены пробойные характеристики. Характеристики имели типичный вид [6] с двумя ветвями.

Нижняя ветвь соответствует пробою, возникающему при установлении постоянного магнитного поля с последующей подачей напряжения на электроды трубки. Верхняя ветвь соответствует обратной последовательности наложения полей. Значительный сдвиг верхних ветвей обусловлен большой неоднородностью радиального электрического поля.

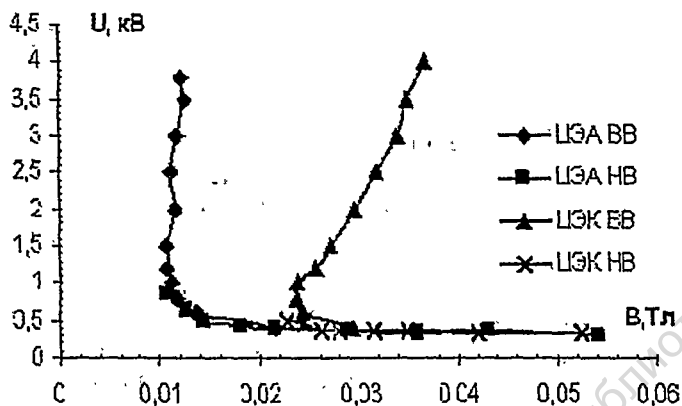


Рис. 7. Пробойные характеристики разряда (ЦЭА — центральный электрод анод, ЦЭК — центральный электрод катод, ВВ — верхняя ветвь, НВ — нижняя ветвь)

Пленки формировались на стеклянной подложке. Через трубку пропускались одиночные импульсы от конденсатора. Пробой промежутка осуществлялся в основном по верхней ветви, т. е. устанавливалось напряжение на трубке, а затем повышалось магнитное поле до пробоя. Суммарный заряд, пропускаемый через трубку, — 1–3 Кл. Полученные образцы обладали большим удельным сопротивлением. Сопротивление между точками пленки, расположенными на расстоянии ~1мм, составляло величину более 100 МОм. Образцы имели гладкую поверхность. При соответствующем освещении возникала интерференционная картина. Ее четкость свидетельствует об однородности пленок и высокой степени центральной симметрии. Это, в свою очередь, говорит об однородности разряда в радиальном направлении.

Исследование полученных пленок осуществлялось с помощью электронного микроскопа ЭМ-125 в режимах «на просвет» и «микродифракция».

Исследованные пленки являются довольно однородными и характеризуются в основном наличием алмазоподобного разупорядоченного углерода. Изменение условий получения приводит к перераспределению дифракционной интенсивности между двумя широкими пиками, близкими к максимумам (111) и (220) алмаза,

что, может быть связано с изменением размеров кристаллитов в направлениях перпендикулярных и параллельных к плоскостям совершенной спайности в алмазе.

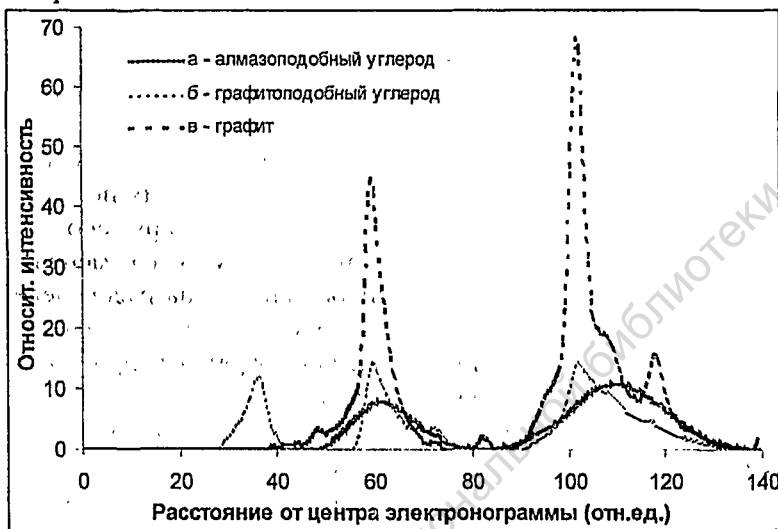


Рис. 8. Электронограммы и соответствующие им кривые распределения дифракционной интенсивности наиболее характерных областей, обнаруженных в полученных пленках и соответствующих алмазоподобному (а) и графитоподобному (б) углеродам, а также, графиту (в)

Таким образом, полученные пленки подтверждают азимутальную однородность магнетронного разряда. Высокая степень центральной симметрии пленок позволяет рассматривать их как перспективный элемент оптических систем.

Заключение

1. Выполнено исследование разряда постоянного тока в скрещенных полях в гелии. Исследование включало развитие нелокальной теоретической модели, измерение радиального распределения ФРЭ, потенциала, а также интенсивности отдельных линий атомарного спектра.
2. Измеренные ФРЭ в медленной части соответствовали максвелловскому распределению с температурой несколько тысяч градусов Кельвина. Особенности ФРЭ являются избыток электронов с энергией около 15 эВ и обеднение ФРЭ при

энергиях, превышающих 20 эВ. Первая особенность обусловлена образованием молекулярных ионов при столкновении двух метастабильных атомов, при котором возникают электроны с указанной энергией. Вторая — связана с возбуждением нижних уровней атомов гелия. Установлено, что основным процессом ионизации в разряде является прямая ионизация.

3. Исследования проведены в двух разрядных трубках с различным разрядным промежутком и при различных полярностях внутреннего и внешнего электродов. Обнаружено, что для трубки с большим разрядным промежутком изменение полярности оказывает существенное влияние на распределение потенциала в разряде. Происходит изменение глубины потенциальной ямы. В трубке с малым разрядным промежутком, где площади электродов отличаются меньше, изменение полярности не оказывает существенного влияния на распределение потенциала. В этой трубке почти весь разрядный промежуток занят областью отрицательного свечения, а фарадеево темное пространство занимает примерно 1 мм около анода. Наблюдается существенное различие в функциях распределения в области запертых электронов. В то же время в области быстрых электронов функция мало меняется при изменении полярности.
4. Исследовано влияние магнитного поля на разделение разряда на катодный слой и плазму. Толщина слоя определяется движением ионов, которое при исследованных магнитных полях практически не зависит от величины магнитного поля. Толщина же отрицательного свечения, которая определяется пробегом быстрых электронов, существенно уменьшается с ростом магнитного поля. Радиальное распределение потенциала обнаруживает отрицательное анодное падение, образующее потенциальную яму с глубиной 1–2 вольта. Так как концентрация электронов обусловлена в основном электронами, запертыми в этой потенциальной яме, то она описывается уравнением Больцмана.
5. Полученные ФРЭ хорошо согласуются с развитой в работе нелокальной кинетической моделью для описания электронов. Получено решение кинетического уравнения для элект-

тронов, ответственных за перенос тока в фарадеевом темном пространстве. Наблюдается хорошее согласие с экспериментом.

6. Полученные результаты могут послужить основой для построения более точной и подробной кинетической самосогласованной модели разряда магнетронного типа.
7. Проведено исследование анодной области тлеющего разряда при наличии магнитного поля, скрещенного с электрическим полем у анода. Влияние катода при этом исключалось. В отличие от разряда магнетронной конфигурации, удалось провести исследование в более широком интервале магнитных полей. При этом наложение более сильного магнитного поля меняет знак анодного падения с отрицательного на положительный. Измерены ФРЭ в прианодной области, которая образована в основном медленными вторичными электронами. Кинетическое уравнение, которому она удовлетворяет, совпадает с уравнением для электронов, переносящих ток в фарадеевом темном пространстве магнетронного разряда.
8. С помощью магнетронного разряда с графитовыми электродами получены пленки алмазоподобного характера, которые обладают высокой степенью однородности и центральной симметрии и могут быть использованы как перспективный элемент оптических систем.

Цитированная литература

- [1] Вагнер С. Д., Шляев Б. В. // ЖТФ. 1978. Т. 48. Вып. 4. С. 675–680.
- [2] Porókhova A., Golubovskii Yu. B., Csambal C., Kudrna P., Tichy M., Behnke J. F., Passoth E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1999. Vol. 32. P. 2655–2665.
- [3] Kolobov V. I., Tsendin L. D. // Phys. Rev. A. 1992. Vol. 46. № 12. P. 7837–7852.
- [4] Клярфильд Б. Н., Неретина Н. А. // ЖТФ. 1953. Т. XXVIII. Вып. 2. С. 296–315.
- [5] Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
- [6] Вагнер С. Д., Зайдман С. Ш., Попков Ю. Ю., Шляев Б. В. // Электронная техника. 1974. Сер. 4, вып. 10. С. 77–79.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах

1. Платонов А. А., Слышов А. Г., Вагнер С. Д., Цендин Л. Д. Самосогласованная структура разряда постоянного тока с замкнутым холловским дрейфом в скрещенных полях // ЖТФ. 2006. Т. 76, вып.7. С. 22–26.
2. Платонов А. А., Слышов А. Г., Вагнер С. Д. О кинетике электронов в прианодной области тлеющего разряда в скрещенных полях // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, вып.24. С. 88–94.

Статьи в сборниках докладов конференций

1. Платонов А. А., Гудков П. С., Вагнер С. Д., Слышов А. Г. Исследование ФРЭЭ в разряде со скрещенными полями в гелии // Материалы конференции по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-2004. Петрозаводск, 2004. Т. 1. С. 100–104.
2. Платонов А. А., Вагнер С. Д., Игнатьев Б. К., Калининская Т. В., Ковалевский В. В. Формирование алмазоподобных пленок в разряде в скрещенных полях // Материалы конференции по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-2004. Петрозаводск, 2004. Т. 1. С. 186–191/
3. Платонов А. А. Структура разряда в скрещенных полях в гелии // Сборник материалов I Всероссийской конференции молодых ученых (26–29 апреля 2005 г., Томск). Томск, 2005. С. 325–327.
4. Platonov A., Slyshov A. G., Wagner S. D. ANODE REGION OF A DIRECT CURRENT DISCHARGE IN CROSSED FIELDS // V International Conference Plasma Physics and Plasma Technology PPPT-5. Minsk, 2006. Vol. 1: P. 38–41.
5. Platonov A., Chernov I. A., Sasin A. V., Ignatiev B. K., Wagner S. D. FILM GROWTH IN A DISCHARGE IN CROSSED FIELDS // V International Conference Plasma Physics and Plasma Technology PPPT-5. Minsk, 2006. Vol. 2. P. 665–667.

Отчеты о НИР

1. Научно-образовательный центр по фундаментальным проблемам приложений физики низкотемпературной плазмы

(НОЦ «Плазма») // Отчет о НИР. Рук. темы А. Д. Хахаев. Рег. во ВНИИЦ № 01.20.0215108, инв. № 02.2.00603853. Петрозаводск, 2005. 309 с.

2. Разряд в скрещенных полях и образование тонких пленок // Отчет о НИР Рук. отчета С. Д. Вагнер Рег. во ВНИИЦ № 0120.0503282, инв. № 02.2.00604399. Петрозаводск, 2006. 30 с.

Из фондов Российской национальной библиотеки

Из фондов Российской национальной библиотеки

Подписано в печать 10.04.2007. Формат 60x84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Изд. № 18. Заказ **81**.

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Карельский государственный педагогический университет»
Республика Карелия. 185680, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 17
Печатный цех КГПУ

Лист А
9096

Р-0000

Из фондов Российской национальной библиотеки