

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТРУДНЕННОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА В АЗОТЕ

В.А. Лисовский, Е.А. Кравченко, Е.В. Скубенко

Харьковский национальный университет

Украина

Поступила в редакцию 07.06.2010

В настоящей работе экспериментально исследованы затрудненный и аномальный режимы горения тлеющего разряда постоянного тока в азоте, а также переход между ними. Показано, что затрудненный разряд может наблюдаться только при условиях, соответствующих левой ветви кривой Пашена. Получено, что тлеющий разряд постоянного тока в исследованном диапазоне давлений азота имеет S-образную вольт-амперную характеристику (затрудненный и аномальный режимы горения имеют растущие вольт-амперные характеристики, однако, переход между ними сопровождается ростом разрядного тока при понижении напряжения на электродах). Обнаружено, что переход из затрудненного в аномальный режим сопровождается низкочастотными релаксационными колебаниями разрядного тока в килогерцовом диапазоне. Эти колебания вызваны, по-видимому, формированием и распадом вблизи анода отрицательного свечения.

Ключевые слова: разряд постоянного тока, затрудненный разряд, аномальный разряд, пробой газа, вольт-амперные характеристики, колебания.

У цій роботі експериментально досліджені затруднений та аномальний режими горіння тліючого розряду постійного струму в нітрогені, а також перехід між ними. Показано, що затруднений розряд може спостерігатися тільки за умов, які відповідають лівій вітці кривої Пашена. Отримано, що тліючий розряд постійного струму в дослідженому діапазоні тиску нітрогену має S-образну вольт-амперну характеристику (затруднений та аномальний режими горіння мають вольт-амперні характеристики, які збільшуються, однак, перехід між ними супроводжується зростанням розрядного струму при зниженні напруги на електродах). Виявлено, що перехід із затрудненого в аномальний режим супроводжується низкочастотними релаксаційними коливаннями розрядного струму в кілогерцовому діапазоні. Ці коливання спричиненні, мабуть, формуванням та розпадом поблизу аноду негативного світіння. Низкочастотні коливання спостерігаються в обмеженому діапазоні тиску нітрогену та розрядного струму. Із зростанням тиску газу частота коливань знижується.

Ключові слова: розряд постійного струму, затруднений розряд, аномальний розряд, пробій газу, вольт-амперні характеристики, коливання.

This paper studies in experiment the obstructed and abnormal modes of dc glow discharge in nitrogen as well as the transition between them. The paper reports the observation of the obstructed discharge only under conditions corresponding to the left-hand branch of Paschen curve. The dc glow discharge in the nitrogen pressure range studied was shown to possess an S-shaped current-voltage characteristics (obstructed and abnormal burning modes possess growing CVCs but the transition between them was accompanied by the discharge current growth with voltage drop across the electrodes lowering). The transition from the obstructed mode to the abnormal is shown to be accompanied by low-frequency relaxation oscillations of the discharge current in a kilohertz range. These oscillations are probably due to the negative glow forming and decaying near the anode. They are observed in a limited nitrogen pressure and current ranges. With the gas pressure increasing the oscillation frequency decreases.

Keywords: direct current discharge, obstructed discharge, abnormal discharge, gas breakdown, current-voltage characteristics, oscillations.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования тлеющего разряда низкого давления проводятся уже более ста лет. Тлеющий разряд является одним из самых старых и, казалось бы, наиболее всесторонне исследован-

ных явлений в области газового разряда. Однако в последнее время тлеющий разряд стал все более широко использоваться для различных технологических нужд, в частности, в области лазерной техники, для модифи-

кации поверхности различных промышленных изделий [1 – 4]. Широкое распространение всевозможных технологических применений тлеющего разряда вновь возродило интерес к нему. В результате в последнее время было опубликовано большое число работ, посвященных изучению тлеющего разряда постоянного тока.

Термином “газовый разряд” пользуются, когда хотят сказать, что в газообразной среде протекает электрический ток. Для прохождения тока необходимы ионизация каким-либо агентом некоторых частиц газа и существование электрического поля, продвигающего созданные при ионизации заряженные частицы. Для выполнения этих условий часто не обязательны электроды.

Газовый разряд может возникнуть в широком диапазоне давлений газа, а ток разряда может изменяться от малых, едва поддающихся измерению значений, до значений порядка 10^{-6} А и более [1]. Встречаются как стационарные, так и нестационарные газовые разряды очень малой длительности. На протекание газового разряда влияют характеристики электрической цепи, частью которой он является.

Одной из наименее исследованных форм тлеющего разряда является затрудненный разряд, который наблюдается при условиях, когда толщина катодного слоя больше либо равна расстоянию между электродами. Первые результаты исследований затрудненного разряда представлены в работах [5, 6]. Гюнтершульце [5] измерил зависимость падения напряжения на электродах от расстояния между катодом и анодом при фиксированном разрядном токе и показал, что напряжение резко увеличивается, когда анод приближается к границе катодного слоя. Пеннинг [6] измерил вольт-амперные характеристики разряда в гелии при неизменном давлении и различных расстояниях между электродами. Обзор ранних результатов исследований затрудненного разряда представлен в работе [7].

Авторы [8] обнаружили, что затрудненный тлеющий разряд в неоне обладает сильным оптогальваническим эффектом. Облучение этого разряда лазерным излучением с длиной волны 594,5 нм привело к значительному

уменьшению разрядного тока. Этот эффект был объяснен тем, что лазерное излучение вызывает разрушение метастабильных атомов, которые играют важную роль в эмиссии электронов из поверхности катода.

В работе [9] были измерены пространственное распределение электрического поля, интенсивности излучения и профили линий излучения H_{α} и H_{β} затрудненного разряда в водороде. Напряженность электрического поля определялась из штарковского расщепления линии H_{β} . Получено, что осевое электрическое поле сохраняется высоким во всем разрядном промежутке. Радиальные распределения электрического поля и интенсивности излучения показывают, что затрудненный разряд является почти кольцевым. Авторы [9] также наблюдали колебания тока и напряжения, которые они объяснили периодическим коллапсом пристеночного слоя.

Авторы [10] исследовали затрудненный разряд в гелии экспериментально, а также с помощью моделирования Монте Карло. Они получили, что вольт-амперные характеристики затрудненного разряда являются растущими, а также с помощью штарковской спектроскопии определили пространственное распределение электрического поля. Распределение электрического поля также было получено с помощью моделирования и хорошо согласуется с результатами измерения.

В работе [11] разработана электронная пушка на основе затрудненного разряда, позволяющая получать потоки электронов от 2 до 10 кэВ. Эта пушка состоит из вогнутого латунного катода и анода с отверстием для экстракции электронного пучка. Авторы показали, что затрудненный разряд обладает растущей вольт-амперной характеристикой. Эксперименты проводились в гелии и водороде при давлении газа $p \approx 0,01$ Торр, когда длина свободного пробега электронов была сравнима с расстоянием между катодом и анодом. При таких условиях электроны редко совершают ионизирующие столкновения с молекулами газа. Поэтому авторы [11] предположили, что значительную роль в поддержании затрудненного разряда может играть процесс перезарядки. Образовавшийся при ионизирующем столкновении положительный ион уско-

ряется в сильном электрическом поле и набирает значительную энергию. Сталкиваясь с нейтральной молекулой газа, этот ион обменивается с ней электроном и превращается в быструю нейтральную молекулу, а образовавшийся медленный положительный ион ускоряется по направлению к катоду. Этот процесс может повториться несколько раз, пока ион не достигнет поверхности катода. Сопровождающие ион быстрые нейтральные молекулы газа сталкиваются с катодом и могут вызвать появление вторичных электронов.

Анализ перечисленных выше опубликованных работ [5 – 11] показывает, что затрудненный тлеющий разряд остается недостаточно исследованным. В частности, не изучены подробно условия, при которых затрудненный разряд может существовать, а также его переход в аномальный тлеющий разряд.

В настоящей работе экспериментально исследован затрудненный разряд в азоте между плоскими электродами. Выяснен диапазон давлений газа, в котором затрудненный разряд может наблюдаться. Показано, что затрудненный разряд в азоте имеет растущую вольт-амперную характеристику. Обнаружено, что переход из затрудненного в аномальный тлеющий разряд происходит с уменьшением напряжения между электродами, при этом наблюдаются низкочастотные релаксационные колебания разрядного тока.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для изучения характеристик тлеющего разряда постоянного тока низкого давления использовался экспериментальный комплекс, блок-схема которого показана на рис. 1.

Вакуумная камера представляет собой отрезок цилиндрической трубы из стекла с внутренним диаметром 56 мм, вакуумно уплотненный с торцов фланцами. Эксперименты проводились с внутренними цилиндрическими электродами с плоскими торцами, изготовленными из нержавеющей стали. Внешний диаметр электродов равен 55 мм, т.е. немного меньше внутреннего диаметра разрядной трубки. Расстояние между катодом и

анодом можно было изменять, передвигая электроды. Измерения проведены при расстоянии между электродами $L = 10$ мм.

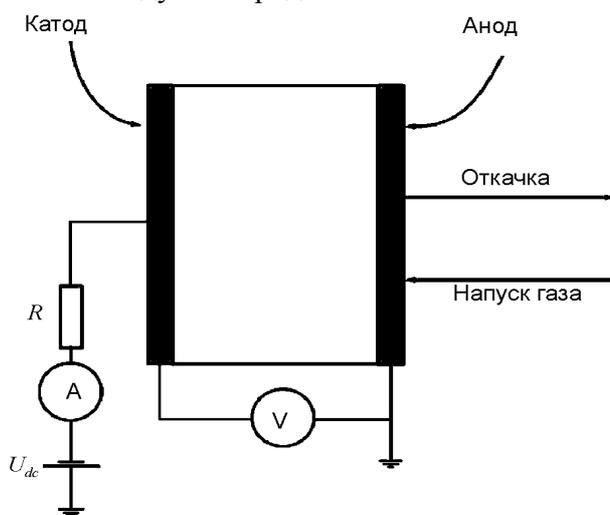


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для исследования тлеющего разряда постоянного тока.

Исследования проводились в азоте в диапазоне давлений $p = 0,08 - 10$ Торр. Камера откачивалась форвакуумным насосом до предельного вакуума ($1 \cdot 10^{-3}$ Торр). Рабочий газ напускался при помощи системы напуска СНА-1, давление газа контролировалось вакуумным теплоэлектрическим реле РВТ-2М. Погрешность измерения давления составляла 10 – 15%. Давление газа в камере устанавливалось путем изменения сечения вакуумпровода регулируемым вакуумным клапаном, что обеспечивало постоянство скорости потока газа в камере при различных давлениях.

При исследовании зажигания тлеющего разряда постоянного тока на катод подавалось постоянное напряжение $U_{dc} \leq 4000$ В от блока питания БП-67. В разрядную цепь между катодом и источником постоянного напряжения последовательно подключался резистор сопротивлением 75 кОм.

Перед выполнением измерений проводили очистку поверхности катода, зажигая тлеющий разряд в азоте при давлении $p \approx 0,5$ Торр и разрядном токе $I_{dc} = 5$ мА в течение 10 мин. При этих условиях поток ионов на катод достаточно велик для удаления монослоев газов, оставшихся на поверхности катода после проведения механической шлифовки и полировки, но разрядный ток еще недостаточен для появления катодных пятен, приводящих к эрозии поверхности катода. Какие-либо

внешние источники ионизации не использовались, исследовалось исключительно зажигание самостоятельного тлеющего разряда постоянного тока.

Измерение кривой зажигания проводилось следующим способом. При различных фиксированных давлениях газа p измеряли напряжение пробоя U_{dc} . Точность измерения напряжения пробоя была $\pm 5\%$.

В разрядную цепь также последовательно подключался резистор сопротивлением 470 Ом, падение напряжения на котором могло подаваться на осциллограф С9-18, а также на низкочастотный анализатор спектра СК 4–58. Эти приборы использовались для изучения низкочастотных колебаний, возникающих при переходе разряда из затрудненного в аномальный режим горения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Как известно, в затрудненном разряде весь зазор между электродами занимает катодный слой, а при формировании вблизи анода отрицательного свечения разряд переходит в аномальный режим горения.

Еще в ранней работе [5] было показано, что затрудненный разряд наблюдается при низких давлениях газа, соответствующих левой ветви кривой зажигания тлеющего разряда (кривой Пашена). Однако из работы [5] не ясно, наблюдается ли затрудненный разряд вблизи и слева от минимума кривой зажигания или имеется некоторое давление газа (меньшее давления, соответствующего минимуму кривой Пашена), слева от которого затрудненный разряд может существовать. Поэтому в настоящей работе была измерена кривая зажигания тлеющего разряда постоянного тока, показанная на рис. 2. Из рис. 2 видно, что минимум кривой зажигания находится при давлении азота $p \approx 0,55$ Торр. Однако визуальное наблюдение разряда показывает, что при таком давлении разряд состоит не только из катодного слоя, но также из отрицательного свечения. Поэтому очевидно, что затрудненный разряд должен наблюдаться при более низких давлениях. Исследования показали, что для существования затрудненного разряда в азоте при зазоре между электродами 10 мм давление должно быть в диапазоне

$p \leq 0,2$ Торр. Это давление показано на рис. 2 пунктирной линией.

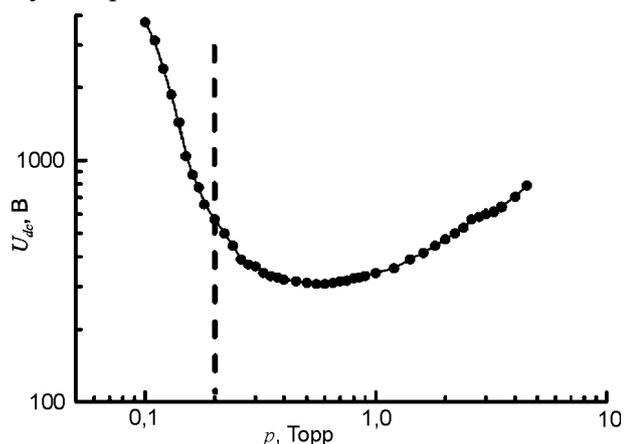


Рис. 2. Кривая зажигания тлеющего разряда постоянного тока в азоте для расстояния $L = 10$ мм между электродами. Пунктирной линией показано максимальное давление, при котором может наблюдаться затрудненный разряд.

На рис. 3 показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) затрудненного и аномального режимов, а также переход между ними.

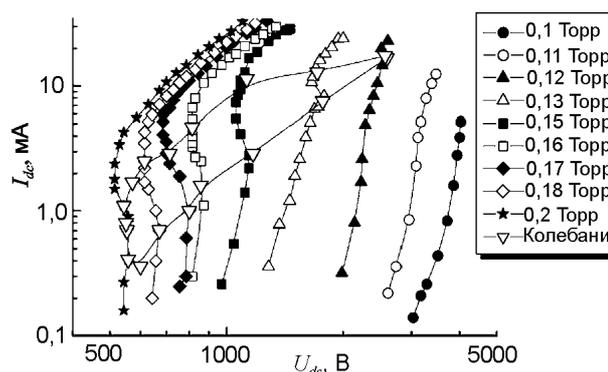


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда постоянного тока при различных давлениях азота, а также область существования низкочастотных колебаний.

Из рис. 3 следует, что ВАХ затрудненного разряда является растущей, то есть повышение тока сопровождается увеличением напряжения между электродами. При давлениях азота 0,1 и 0,11 Торр наблюдался только затрудненный разряд. При более высоких давлениях газа после достижения разрядным током некоторой критической величины вблизи анода начинает формироваться отрицательное свечение, наблюдается переход из затрудненного в аномальный режим горения. Этот переход сопровождается понижением напряжения на электродах с ростом то-

ка, вольт-амперная характеристика принимает S-образный вид, при этом на осциллограмме появляются колебания разрядного тока с частотой в несколько килогерц. Эти низкочастотные колебания тока существуют в ограниченной области давлений газа и разрядных токов. Верхняя и нижняя границы этой области показаны на рис. 3. После полного формирования отрицательного свечения разряд горит в аномальном режиме, в котором ток растет с повышением напряжения на электродах.

Для выяснения поведения вольт-амперной характеристики при переходе разряда из затрудненного в аномальный режим были выполнены следующие измерения. При фиксированном давлении азота 0,15 Торр вольт-амперная характеристика была измерена с различными резисторами во внешней цепи (25 кОм, 50 кОм, 75 кОм и 125 кОм). В результате было получено, что при величине внешнего резистора 25 кОм переход из затрудненного в аномальный режим горения происходит скачком с одновременным ростом тока и понижением напряжения на электродах. С внешним резистором 50 кОм переход происходит непрерывно, но имеется большой разброс экспериментальных точек. Для внешних резисторов 75 кОм и 125 кОм вольт-амперные характеристики практически наложилось (вольт-амперная характеристика для 75 кОм приведена на рис. 4). На этом же рис. 4 показаны нагрузочные характеристики для внешних резисторов 40 кОм и 75 кОм.

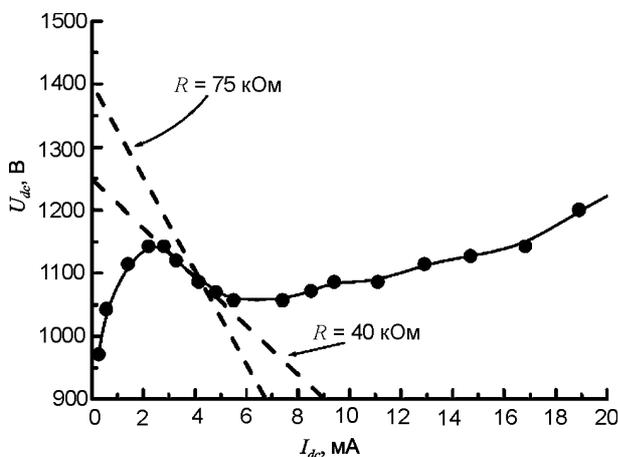


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика разряда при давлении азота 0,15 Торр, а также нагрузочные характеристики для сопротивлений во внешней цепи 40 кОм и 75 кОм.

Из рис. 4 следует, что для корректного измерения вольт-амперной характеристики перехода из затрудненного в аномальный режим горения нужно во внешнюю цепь подключать резистор более 40 кОм.

Кроме того, при проведении данного эксперимента было получено, что низкочастотные колебания разрядного тока наблюдались не только с внешним резистором 25 кОм (когда переход был скачкообразным), но и при более высоких сопротивлениях резисторов. При этом ни осциллограмма колебаний (показанная на рис. 5), ни частота колебаний (см. рис. 6) не зависели от характеристик внешней цепи. Эти колебания остались неизменными при параллельном подключении к электродам конденсатора (КВИ-3) емкостью 470 пФ. Следовательно, наблюдаемые НЧ колебания не вызваны аппаратным эффектом, а являются характеристикой исследуемого тлеющего разряда.

Из осциллограммы тока (рис. 5) видно, что колебания имеют релаксационный характер, т.е. есть участки резкого увеличения и более плавного уменьшения разрядного тока. При этом амплитуда колебаний составляла до 5% разрядного тока.

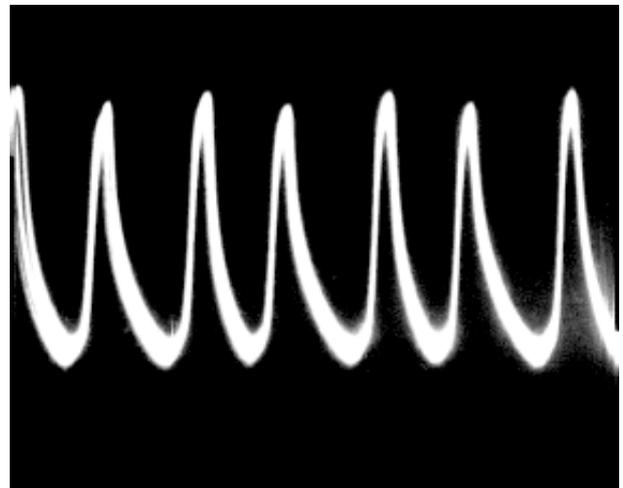


Рис. 5. Осциллограмма колебаний разрядного тока, возникающих при переходе из затрудненного в аномальный режим горения, при давлении азота 0,15 Торр.

В работе [9] экспериментально было получено, что в затрудненном разряде электрическое поле сохраняется большим во всем зазоре между электродами. Этот вывод подтверждается расчетами работы [10]. С ростом разрядного тока концентрация заряженных

частиц в зазоре увеличивается, напряженность поля вблизи катода возрастает, но вблизи анода понижается. В аномальном тлеющем разряде при удалении от катода плотность плазмы быстро возрастает и достигает максимума в отрицательном свечении. Очевидно, что в затрудненном разряде концентрация заряженных частиц также должна быть максимальной вблизи поверхности анода. По-видимому, при достижении током затрудненного разряда некоторой пороговой величины вблизи анода формируется область отрицательного свечения. При этом плотность плазмы вблизи анода резко увеличивается и возрастает разрядный ток. Тогда, согласно закону Ома для полной цепи, напряжение на электродах уменьшается. Это приводит к снижению ионизации во всем катодном слое. Образовавшаяся вблизи анода область плотной плазмы расплывается, электроны частично уходят в анод, а положительные ионы движутся к катоду. При сниженной ионизации уход заряженных частиц вызывает снижение разрядного тока, что видно из осциллограммы на рис. 5. После ухода из разрядного промежутка части положительных ионов и снижения тока напряжение на электродах увеличивается, и в катодном слое снова развиваются интенсивные электронные лавины. В свою очередь, это приводит к быстрому росту разрядного тока, и процесс повторяется.

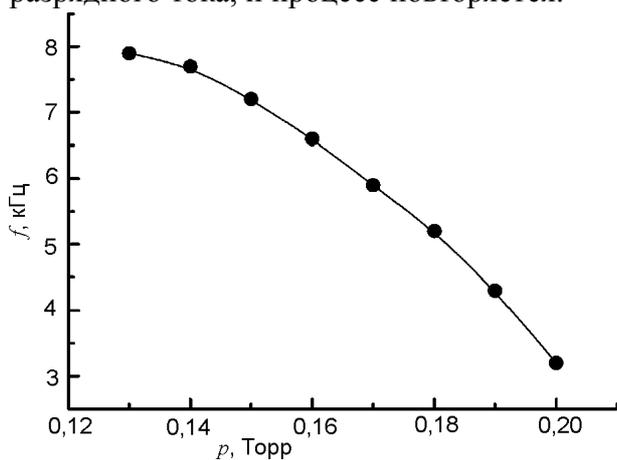


Рис. 6. Зависимость частоты колебаний разрядного тока, возникающих при переходе из затрудненного в аномальный режим горения, от давления азота.

Из рис. 6 следует, что при низких давлениях частота колебаний достигает 8 кГц. Эта низкая частота связана с большим време-

нем ухода положительных ионов из разрядного промежутка. Повышение давления газа увеличивает частоту столкновений ионов с молекулами газа и повышает время движения ионов от анода до катода, что приводит к уменьшению частоты колебаний.

Нами были сделаны фотографии затрудненного тлеющего разряда, перехода из затрудненного в аномальный и аномального. Эти фотографии были обработаны с помощью программы MathCad 2001iPro. Полученные осевые интегральные профили свечения показаны на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что вблизи катода наблюдается широкий максимум свечения (имеющий розовую окраску). Вторичные электроны, вышедшие вследствие ион-электронной эмиссии с поверхности катода, набирают в сильном электрическом поле катодного слоя энергию и сначала возбуждают низколежащие энергетические уровни молекул газа. Поэтому вблизи катода свечение разряда находится в красной части спектра. При дальнейшем ускорении электронов в электрическом поле их энергия переваливает через максимум сечения возбуждения низколежащих уровней, но при этом электроны возбуждают более высокие уровни, а также ионизуют молекулы газа. Поэтому вблизи анода свечение разряда имеет синюю окраску. С ростом разрядного тока плотность заряженных частиц вблизи анода возрастает, что приводит к понижению напряженности электрического поля вблизи анода и усилению вблизи катода. При некоторой пороговой величине тока

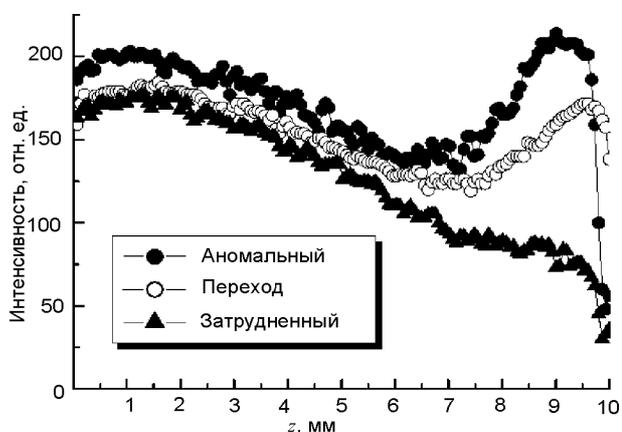


Рис. 7. Интенсивности свечения затрудненного тлеющего разряда ($I_{dc} = 0,4$ мА), перехода из затрудненного в аномальный (3 мА) и аномального (10 мА) при давлении азота 0,15 Торр.

вблизи анода может сформироваться отрицательное свечение, которое при этих условиях пока является неустойчивым.

Из рис. 7 видно, что вблизи анода появился узкий пик интенсивности свечения, прижимающийся к его поверхности. Дальнейшее повышение тока стабилизирует отрицательное свечение, пик интенсивности свечения вблизи анода возрастает и становится более широким. Разряд при этих условиях горит в аномальном режиме.

ВЫВОДЫ

В данной работе были экспериментально исследованы затрудненный и аномальный режимы горения тлеющего разряда постоянного тока в азоте, а также переход между ними. Измерения проведены в трубке радиусом 55 мм, в то время как расстояние между электродами было равно 10 мм.

Выяснено, что затрудненный разряд может наблюдаться только при условиях, соответствующих левой ветви кривой Пашена. При условиях экспериментов максимальное давление азота, при котором затрудненный разряд может существовать, было равно $p \approx 0,2$ Торр, в то время как минимум кривой зажигания находится при давлении азота $p \approx 0,55$ Торр.

Показано, что и затрудненный, и аномальный режимы горения имеют растущие вольт-амперные характеристики. Однако переход между ними сопровождается ростом разрядного тока при понижении напряжения на электродах. Таким образом, тлеющий разряд постоянного тока в исследованном диапазоне давлений азота имеет S-образную вольт-амперную характеристику.

Получено, что переход из затрудненного в аномальный режим сопровождается низкочастотными колебаниями разрядного тока в килогерцовом диапазоне. Эти колебания имеют релаксационный характер и вызваны, по видимому, формированием и распадом вбли-

зи анода отрицательного свечения. Наблюдаемые низкочастотные колебания могут существовать в ограниченном диапазоне давлений азота и разрядного тока. Показано, что частота колебаний понижается с ростом давления газа. Приведены также осевые профили интегральной интенсивности свечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
2. Звелто О. Принципы лазеров. – М.: Мир, 1990. – 560 с.
3. Chen F.F. Industrial applications of low-temperature plasma physics//Phys. Plasmas. – 1995. – Vol. 2, № 6. – P. 2164-2175
4. Солошенко И.А., Циолко В.В., Хомич В.А., Щедрин А.И., Рябцев А.В., Баженов В.Ю., Михно И.Л. Применение тлеющего разряда низкого давления для стерилизации медицинских изделий//Физика плазмы. – 2000. – Т. 26, № 9. – С. 845-853.
5. Guntherschulze A. Die behinderte Glimmentladung. II//Z. Physik. – 1930. – Vol. 61. – P. 581-586.
6. Penning F.M. Zweierlei negative Charakteristiken bei selbständigen Gasentladungen//Physik. Zeitschr. – 1932. – Vol. 33. – P. 816-822.
7. Francis G. The glow discharge at low pressure//Encyclopedia of physics. – 1956. – Vol. 22. – P. 53-208.
8. Doughty D.K., Lawler J.E. Optogalvanic effects in the obstructed glow discharge//Appl. Phys. Lett. – 1983. – Vol. 43, No. 3. – P. 234-236.
9. Ganguly B.N., Garscadden A., Electric field and Doppler emission profile measurements in an obstructed hydrogen discharge//J. Appl. Phys. – 1991. – Vol. 70, No. 2. – P. 621-627.
10. Donko Z., Rozsa K., Tobin R.C., Peard K.A., Modeling and measurements on an obstructed glow discharge in helium//Phys. Rev. E. – 1994. – Vol. 49, No. 4. – P. 3283-3289.
11. Fukao M., Ishida M., Ohtsuka Y., Matsuo H., A simple electron gun by obstructed discharge and its discharge - sustaining mechanism//Vac. – 2000. – Vol. 59. – P. 358-372.