

УДК 533. 915

**НОРМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА
В АЗОТЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ****В.А. Лисовский, Н.Д. Харченко, Р.Н. Фатеев***Харьковский национальный университет
61077, пл. Свободы 4, Харьков, Украина
e-mail: nadine@list.ru*

Поступила в редакцию 14 октября 2009 г.

Работа посвящена изучению нормального режима тлеющего разряда постоянного тока в азоте. В результате проведенных экспериментов двумя различными методами показано, что существует переходная область давлений азота (от порогового давления появления нормального режима при $p \approx 0,3 - 0,4$ Торр до примерно $p \approx 2$ Торр), в пределах которой нормальная плотность тока, деленная на давление газа в квадрате j_n/p^2 , не остается постоянной величиной, а уменьшается с ростом разрядного тока и давления газа. Экспериментально получены значения величин j_n/p^2 для различных материалов катодов и различных давлений азота. Проведены измерения радиального распределения плотности тока по площади катода в нормальном и аномальном режимах разряда в азоте при низком давлении. Установлено, что радиальные профили плотности тока в нормальном режиме имеют форму колокола, принимая максимальное значение в центре разрядного пятна. При этом толщина катодного слоя изменяется в радиальном направлении разрядного пятна нормального режима. Она принимает большие значения вблизи краев пятна, одновременно в этих областях наблюдается пониженная плотность тока по сравнению с центром разрядного пятна.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: разряд постоянного тока, нормальный режим, радиальная структура, низкое давление, азот.**НОРМАЛЬНИЙ РЕЖИМ РОЗРЯДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ У НІТРОГЕНІ НИЗЬКОГО ТИСКУ****В.О. Лисовський, Н.Д. Харченко, Р.Н. Фатеев***Харківський національний університет
61077, Харків, пл. Свободи 4, Україна*

Цю роботу присвячено вивченню нормального режиму постійного струму у нітрогені. Двома різними методами показано, що існує перехідний діапазон тисків нітрогену (від граничного тиску, де з'являється нормальний режим, в умовах $p \approx 0,3 - 0,4$ Торр до приблизно $p \approx 2$ Торр), в межах якого нормальна густина струму, поділена на тиск газу в квадраті j_n/p^2 , не залишається сталою, а зменшується зі збільшенням розрядного струму і тиску газу. Експериментально отримані значення величин j_n/p^2 для різноманітних матеріалів катодів та різних тисків газів. Проведено вимірювання радіальних розподілів густини струму по площі катода в нормальному та аномальному режимах розряду в нітрогені низького тиску. Встановлено, що радіальні профілі густини струму в нормальному режимі мають форму дзвона, приймаючи найбільше значення у центрі розрядної плями. При цьому товщина катодного шару змінюється у радіальному напрямку розрядної плями у нормальному режимі. Вона приймає більші значення поблизу границь розрядної плями, одночасно в цих областях спостерігається знижена густина струму в порівнянні з центром розрядної плями.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: розряд постійного струму, нормальний режим, радіальна структура, низький тиск, нітроген.**NORMAL MODE OF THE DC DISCHARGE IN LOW PRESSURE NITROGEN****V.A. Lisovskiy, N.D. Kharchenko, R.N. Fateev***Kharkov National University
61077, Svobody sq., 4, Kharkov Ukraine*

This work is devoted to investigation of the normal mode of DC glowing discharge in nitrogen. As a result of the experiments we made by two different methods it is shown that the transition area of the nitrogen pressure exist (from the threshold pressure of the normal mode appearance $p \approx 0.3 - 0.4$ Torr to $p \approx 2$ Torr) where the normal current density divided to the squared gas pressure j_n/p^2 doesn't remain constant and decreases with the discharge current increasing. Magnitudes j_n/p^2 for different cathode materials and gas pressures were obtained experimentally. The experiments on the investigation of the radial current density distribution across the cathode area in normal and abnormal modes were made. It is obtained that radial current density profile in normal mode has a form of a bell and possesses a maximum in the center of the discharge spot. Thickness of the cathode sheath changes in the radial direction of the discharge spot. It takes maxima values near the spot borders; at the same time in this area lower current density compared to the center of the discharge spot is observed.

KEY WORDS: DC discharge, normal mode, radial structure, low pressure, nitrogen.

Известно, что тлеющий разряд постоянного тока может гореть в нормальном и аномальном режимах. Постоянство катодного падения, имеющее место в нормальном тлеющем разряде в довольно широком интервале токов, используется в таких приборах тлеющего разряда, как газоразрядные стабилизаторы напряжения (стабилитроны), а также выпрямители с тлеющим разрядом и др [1].

Для того чтобы корректно применять нормальный режим тлеющего разряда, необходимо знать условия его существования в различных газах, при различных давлениях и материалах катода, поэтому этот вопрос уже давно исследуется разными авторами [2-27].

С увеличением силы тока в нормальном режиме поверхность, занимаемая разрядом, возрастает, при этом

плотность тока остается постоянной [3]. Для параметров нормального тлеющего разряда (катодного падения потенциала U_n и плотности тока j_n) в случае геометрически подобных трубок, заполненных одним и тем же газом, при одном и том же материале электродов, должны выполняться следующие законы подобия: а) $U_n = const$ и не зависит от силы тока нормального тлеющего разряда и давления газа, б) $j_n/p^2 = const$, в) произведение давления газа и длины прикатодного слоя ($pl_n = const$) [4, 5]. При давлении неона больше 10 Торр обнаружены отклонения в поведении нормального режима от законов подобия, которые объясняются возникновением процессов ступенчатой ионизации в катодной области нормального тлеющего разряда [4]. Автором работы [4] подтверждается выполнение законов подобия нормального режима при более низких давлениях неона, а также в других газах. В работе [5] показано, что увеличение полного тока в электрической цепи не приводит к росту плотности тока, а вызывает увеличение площади, занимаемой разрядом на катоде. После того, как вся поверхность катода оказывается покрытой разрядом, наблюдается переход к аномальному режиму горения, в котором соблюдаются иные законы подобия: $U = f_1(j/p^2)$, $pl = f_2(j/p^2)$ [3, 5]. В работе [6] приведена модель, которая описывает поведение величины j/p^2 в зависимости от величины катодного падения потенциала. Автор [7] с помощью численного моделирования показал, что существует постоянное значение плотности тока в нормальном тлеющем разряде, которое обеспечивает оптимальный уровень ионизации в катодном слое, что могло бы объяснить постоянство значения нормального напряжения, благодаря которому разрядное пятно с увеличением тока расширяется на катоде.

Однако в ряде работ описаны также отклонения нормального тлеющего разряда от законов подобия [8, 9]. Авторами [8] обнаружено увеличение разрядного тока при постоянном напряжении, что соответствует нормальному режиму. Автором [9] путем моделирования показано, что уменьшение нормальной плотности тока на катоде в нормальном режиме тлеющего разряда повышает пороговое напряжение контракции. Для того чтобы достичь этого эффекта, предложено добавлять в плазму вблизи катода небольшое количество атомов с низким потенциалом ионизации.

В ряде работ экспериментально и с помощью численного моделирования изучалось нормальное катодное падение напряжения U_n [10-15]. В работе [10] исследовались зависимости нормального катодного падения потенциала от давления инертных газов в диапазоне от 3 до 40 Торр, приведено сравнение их с величинами, полученными ранее другими авторами. В работах [11, 13] при помощи моделирования методом Монте Карло получены значения катодного падения потенциала в нормальном тлеющем разряде в гелии. В работе [12] разработана модель нелокального размножения электронов для численного моделирования газового разряда в катодной области. Она основана на гидродинамическом описании электронных пучков, которые испускаются с поверхности катода. Автором [13] путем моделирования показано линейное поведение электрического поля в катодном слое. Кроме того, доказывается постоянство распределения нормальной плотности тока с целью поддержания оптимального уровня ионизации, благодаря чему и достигается постоянство падения напряжения на катодном слое, а также уменьшение площади пятна с уменьшением разрядного тока в нормальном режиме. Авторами [14] введена собственная классификация режимов горения тлеющего разряда постоянного тока: простейший, нормальный и плотный в зависимости от тока разряда и произведения давления газа и длины разрядного промежутка. В нормальном режиме наблюдалось, что с увеличением тока напряжение на разряде сохраняется постоянным в одном и том же сорте газа и при одном и том же материале катода. Однако, данная классификация не нашла широкого применения в работах других авторов. В работе [15] представлены результаты экспериментальных измерений различных параметров плазмы тлеющего разряда постоянного тока в различных сортах газов, в том числе величины нормального катодного падения напряжения.

Имеется ряд работ, посвященных изучению радиальной структуры нормального режима разряда постоянного тока [16-22]. В работе [16] подробно рассматриваются процессы, происходящие на границе разрядного пятна в нормальном режиме. Экспериментально показано, что коэффициент размножения электронов максимален на краю разрядного пятна, граничащего с бестоковой областью. Однако, авторы [16] измеряли плотность тока ионов, приходящих на катод, с помощью одного коллектора, и для измерения радиального распределения плотности тока изменяли полный ток (предполагая, что плотность тока в нормальном режиме остается постоянной). Как будет показано нами ниже, такое предположение не оправдано, поэтому радиальные профили, измеренные авторами [16] не корректны. В работе [17] теоретически изучалась величина площади токового пятна с изменением тока на незаполненном катоде в нормальном режиме тлеющего разряда при давлении газа 5 Торр. Показано, что в таких условиях плотность тока по радиусу пятна уменьшается. Наибольшее значение разрядного тока наблюдается в центре разрядного пятна, причем центральная часть его квазиоднородна. При приближении к краю пятна плотность тока монотонно спадала. Авторами [18] было показано, что стабильность разряда, горящего в нормальном режиме, может быть объяснена наличием радиального электрического поля на границе плазма-слой, благодаря которому электроны удерживаются в плазменном столбе. Для исследования самостоятельных разрядов автором [19] была разработана двумерная модель, описывающая разряд в гелии. Несмотря на некоторые ограничения в использовании, модель довольно хорошо отображает характерные черты нормального режима и переход от нормального к аномальному режиму горения тлеющего разряда постоянного тока, учитывая влияние радиального электрического поля. В работе [19] показано, что радиальное электрическое поле, которое

образуется на границе плазма – слой, направляет электроны к центру отрицательного свечения разряда, а ионы - от центра. Существование радиального поля обеспечивает стабильность нормального режима [18]. Авторы [20] также моделировали нормальный тлеющий разряд в гелии, учитывая изотропное рассеяние и отражение электронов от электродов, а также обратное рассеяние в сторону катода. Полученные в работе [20] данные хорошо согласуются с результатами расчета [19]. Авторами [21] разработана модель, которая описывает нормальный и аномальный тлеющие разряды в гелии. Учет анизотропии рассеяния электронов в этой работе значительно улучшает соответствие теоретических результатов экспериментальным. В работе [22] при помощи моделирования методом Монте Карло изучались нормальный и аномальный режимы тлеющего разряда постоянного тока, приведены осевые распределения различных параметров плазмы для нормального режима в сравнение с аномальным. Наблюдались значительные количественные различия параметров плазмы в двух режимах.

Ряд работ посвящен изучению условий появления нормального режима разряда постоянного тока [23-26]. Авторы [23] определили характеристики катодного слоя разряда в аргоне и азоте, а также экспериментально показали, что нормальный режим горения может наблюдаться только справа от точки перегиба кривой зажигания тлеющего разряда. В работе [24] с помощью простой модели объясняется, почему нормальный режим в коротких разрядных трубках появляется справа от точки перегиба кривой зажигания разряда постоянного тока. Авторы работы [25] аналитически показали, что на правой ветви кривой Пашена справа от точки перегиба относительно малое возмущение однородности поля, обусловленное пространственным зарядом, приводит к падающей вольт-амперной характеристике таунсендовского разряда и, как следствие, к его неустойчивости. Это приводит к шнурованию разряда и установлению нормальной плотности тока, при которой разряд занимает только часть поверхности катода. В работе [26] построена математическая модель, при помощи которой получены вольт - амперные характеристики, описывающие различные формы горения тлеющего разряда постоянного тока. В работе [27] объясняется наличие минимума напряжения на вольт-амперной характеристике катодного слоя и существование нормальной плотности тока благодаря двум конкурирующим между собой причинам. Одна из них состоит в том, что величина энергетических затрат на производство одного иона падает с ростом поля, а вторая – в том, что с увеличением тока разряда и уменьшением толщины катодного слоя коэффициент размножения электронов снижается, а катодное падение напряжения растет. Обзорная работа [28] посвящена обобщению результатов моделирования газовых разрядов низкого давления и, в частности, изучению нормального режима постоянного тока.

В большинстве работ нормальный тлеющий разряд исследовался в диапазоне давлений более 2 Торр, и недостаточно исследован при низких давлениях. Поэтому одной из задач, которая решалась в ходе данной работы, является исследование нормального режима горения разряда постоянного тока при давлениях азота менее 2 Торр, а также проверка законов подобия нормального режима для различных материалов катода. Кроме того, в литературе практически нет достоверных экспериментальных данных о распределении различных параметров плазмы по площади разрядного пятна в нормальном режиме. В связи с этим нами была поставлена следующая цель для данной работы: изучить радиальное распределение плотности разрядного тока по площади катода в нормальном и аномальном режимах, уточнить законы подобия нормального режима при давлениях азота в камере менее 2 Торр и различных материалах катодов.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для изучения нормального режима горения разряда постоянного тока в азоте использована разрядная трубка с катодом, содержащим встроенные коллекторы. На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. Кварцевая трубка вакуумно уплотнялась между электродами, диаметр которых составлял 56 мм. Исследования проводились при расстояниях между электродами из нержавеющей стали 50 мм и 400 мм. Азот подавался в камеру с помощью системы напуска газа через множество маленьких отверстий в аноде. Разрядная камера откачивалась через систему отверстий в этом же электроде. Для регистрации давления газа в диапазоне от 10^{-3} Торр до атмосферного использовался вакуумный термоэлектрический датчик 13ВТ3-003. Откачка газа производилась турбомолекулярным насосом с предельным вакуумом порядка 10^{-6} Торр. Источник постоянного напряжения подключался к аноду, а катод был заземлен. По диаметру катода вдоль одной линии располагались 9 коллекторов тока диаметром 3 мм. Собирающая поверхность коллекторов находилась в одной плоскости с поверхностью катода. Выводы коллекторов были заземлены через резисторы 1 кОм. Падения напряжения на сопротивлениях оцифровывались и подавались на персональный компьютер. Токи на все коллекторы измерялись одновременно, при этом измерения проводились 20 раз и полученные результаты усреднялись. Величина разрядного тока регистрировалась цифровым амперметром, а напряжение на разряде – цифровым вольтметром. В разрядную цепь подключалось внешнее сопротивление величиной 50 кОм, которое ограничивало ток и препятствовало возникновению катодных пятен.

Для изучения радиальной структуры разряда использовалась Т-образная разрядная трубка. Схематическое изображение эксперимента приведено на рис. 2. Постоянное напряжение подавалось на катод, а анод был заземлен. Напуск и откачка исследуемого газа производились через заземленный электрод. Катод располагался в одном из боковых (горизонтальных) торцов Т-образной трубки, а анод - в нижней ее части. На

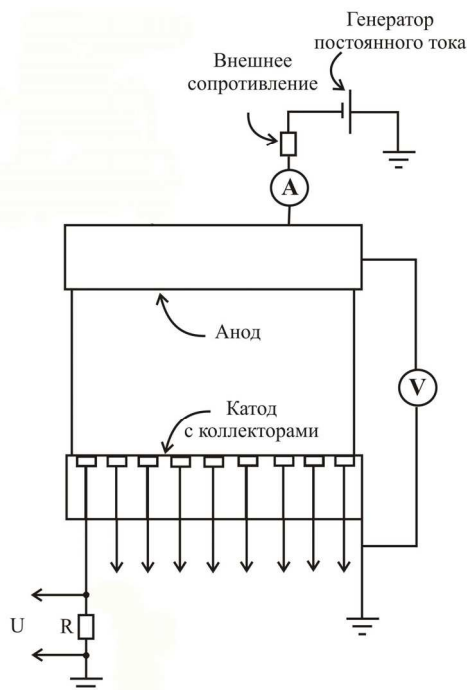


Рис.1. Схема разрядной камеры, содержащей катод с коллекторами.

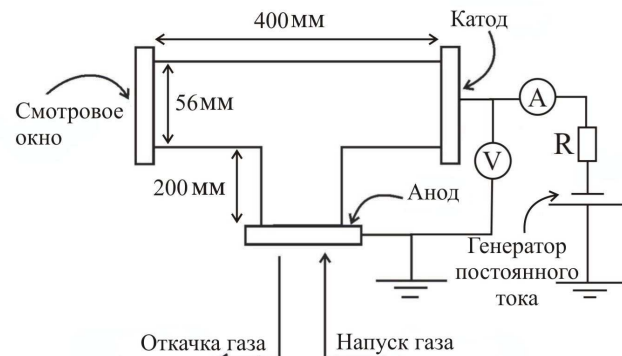


Рис.2. Схема разрядной камеры Т-образной формы.

противоположном конце от катода было расположено смотровое окно, через которое производилось фотографирование разряда вблизи катода. Расстояние между смотровым окном Т-образной трубки и катодом составляло 400 мм, расстояние от анода до оси катода – 200 мм, диаметр электродов – 56 мм. В ходе экспериментов была сделана серия фотографий разряда в азоте в нормальном режиме. При получении каждого снимка фиксировалось соответствующее значение разрядного тока. Фотографии выполнялись цифровой фотокамерой Canon IXUS 500. Серии фотографий нормального режима были

сделаны для различных материалов катода – нержавеющей стали, серебра, меди и магния.

Эксперименты проводились при давлениях азота $p = 0,1 - 2$ Торр в диапазоне постоянного напряжения $U_{dc} \leq 600$ В в случае камеры с коллекторами и $U_{dc} \leq 2000$ для Т-образной разрядной трубки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для изучения нормального режима постоянного тока предварительно определялись границы его существования. На рис. 3 приведены вольт-амперные характеристики разряда для различных фиксированных давлений азота с расстоянием между электродами 50 мм. Из рис. 3 видно, что нормальный режим при давлениях азота $p = 0,1 \div 0,3$ Торр не наблюдается.

Нормальный режим реализуется только на правой ветви кривой зажигания при давлениях приблизительно в три раза больших, чем давление в минимуме кривой зажигания для данной разрядной камеры [23-25]. При дальнейшем увеличении давления газа начинает появляться нормальный режим горения тлеющего разряда (при давлениях $p \geq 0,6$ Торр). Чем выше давление азота, тем в более широком диапазоне токов наблюдается этот режим горения. После зажигания разряд сначала занимает только часть поверхности катода. Затем с ростом разрядного тока разрядное пятно на катоде увеличивается до тех пор, пока не заполнит весь катод. При этом напряжение на разряде остается приблизительно постоянным, что согласуется с данными, полученными другими авторами [10-15]. После покрытия разрядом всей поверхности катода дальнейшее увеличение разрядного тока сопровождается ростом напряжения на электродах, разряд переходит в аномальный режим горения.

Нормальный режим характеризуется нормальным падением напряжения на катодном слое. В наших экспериментальных условиях средние значения нормального падения напряжения на электродах были $U_{dc} = 320 \div 340$ В. Нужно отметить, что для всех значений давления азота при уменьшении тока наблюдалось небольшое повышение нормального напряжения на разряде. Детально этот факт показан на рис. 4.

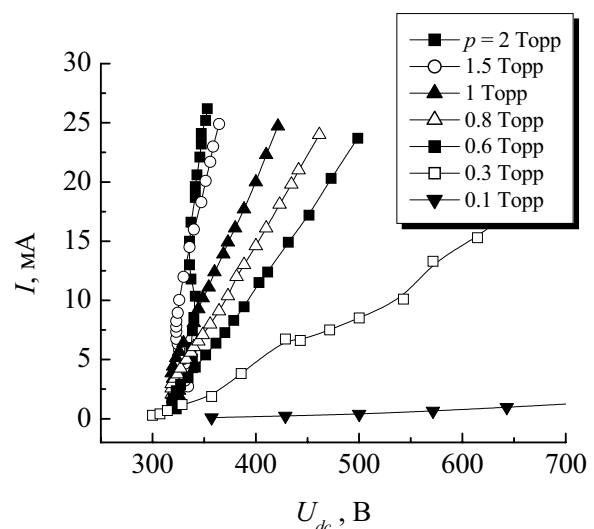


Рис.3. Вольт-амперные характеристики разряда постоянного тока для различных давлений азота (расстояние между электродами 50 мм).

Это можно объяснить, используя закон Ома для полной цепи $U = \varepsilon - I \cdot R$, где ε – ЭДС источника питания, I – разрядный ток, R – внешнее сопротивление цепи. Понижение тока приводит к увеличению напряжения на электродах, что и видно на рис. 4.

На рис. 5 приведены радиальные зависимости плотности тока для различных значений разрядного тока I_{dc} при давлении азота $p = 0,6$ Торр. Как видно из рисунка, при увеличении разрядного тока во всем диапазоне I_{dc} плотность тока увеличивалась. При значениях $I_{dc} < 1,74$ мА разряд горит в нормальном режиме. При этом максимум нормальной плотности разрядного тока j_n наблюдается в центре разрядного пятна, а при удалении от центра j_n быстро уменьшается. Эти экспериментальные данные расходятся с общепринятым мнением о постоянстве распределения плотности тока в разрядном пятне нормального режима [4-9]. Нужно отметить, что для давления азота 0,6 Торр плотность тока в максимуме пятна в нормальном режиме слабо меняется с ростом разрядного тока, и по величине близка к $j_n = 0,1$ мА/см². В бестоковой области ($r \geq 10$ мм), где визуально разряд не наблюдается, на графике (рис. 5) для соответствующих координат на катоде плотность тока равна нулю. При величине разрядного тока $I_{dc} \geq 1,74$ мА разряд горит в аномальном режиме, и значения плотности тока практически не меняются по радиусу разрядной камеры для одного и того же значения тока. При давлениях азота $p \leq 1$ Торр нормальный режим существует в небольшом диапазоне разрядных токов, поэтому проследить динамику изменения нормальной плотности тока разряда довольно сложно. Обычно разрядное пятно располагается не в центре электрода, а смещено к стенке разрядной трубки. По-видимому, стенки трубки оказывают стабилизирующее действие на разрядный шнур нормального режима. Электроны, ушедшие на стенки трубки, заряжают ее поверхность отрицательно до некоторого потенциала U_w . Из-за этого поверхности разрядной трубки могут достичь только самые быстрые электроны, энергия которых $\varepsilon_e \geq eU_w$. Медленные электроны возвращаются обратно в разрядный шнур. В то же время электроны, выносимые вследствие амбиполярной диффузии из разряда в бестоковую область, больше не участвуют в поддержании разряда и теряются вследствие рекомбинации с положительными ионами и дрейфового ухода на анод. Поэтому разрядный шнур нормального режима обычно прижимается к стенке трубки (см., например, рис.9), а не располагается вблизи оси камеры.

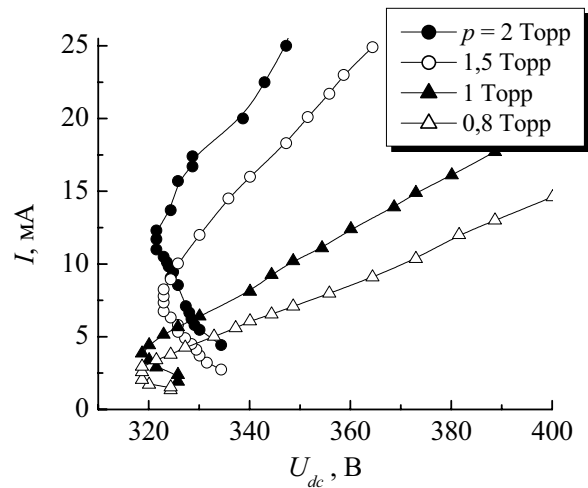


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики разряда постоянного тока для давлений азота, при которых наблюдается нормальный режим разряда постоянного тока (расстояние между электродами 50 мм).

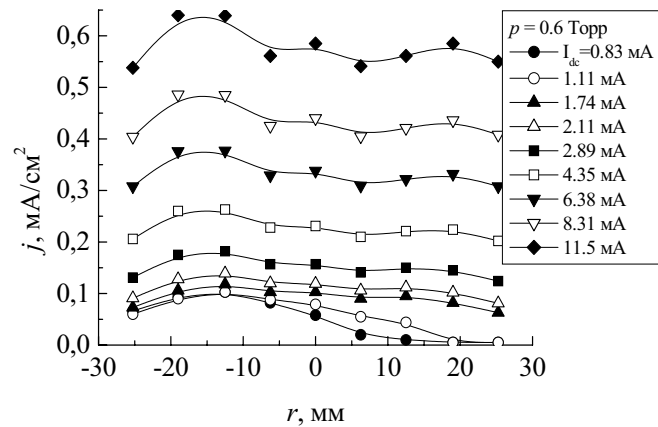


Рис. 5. Радиальные распределения плотности тока для различных значений разрядного тока при давлении азота $p = 0,6$ Торр.

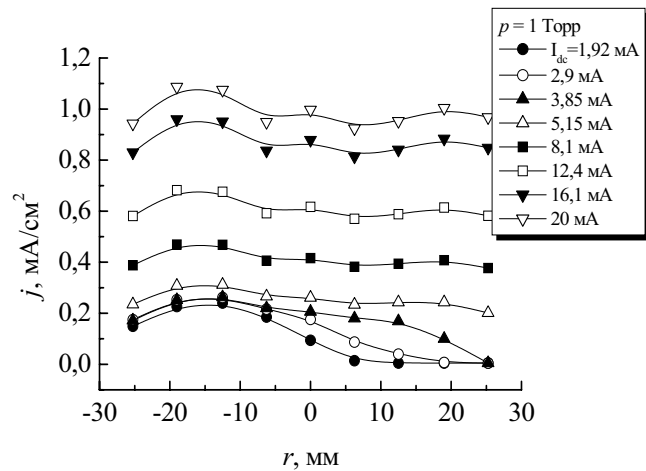


Рис. 6. Радиальные зависимости плотности тока для различных значений разрядного тока при давлении азота $p = 1$ Торр.

На рис. 6 представлены радиальные распределения плотности тока при давлении азота $p = 1$ Торр. При значениях токов $I_{dc} \leq 3,85$ мА разряд горит в нормальном режиме, а затем при увеличении тока переходит в аномальный. На рис. 6 для нормального режима хорошо видно увеличение плотности тока по радиусу камеры с ростом разрядного тока, что свидетельствует о расширении плазменного столба. Среднее значение нормальной плотности разрядного тока примерно равно $j_n = 0,24$ мА/см².

На рис. 7 изображены радиальные зависимости плотности тока при давлении азота $p = 2$ Торр. В этом случае нормальный режим существует при $I_{dc} \leq 13$ мА, в наибольшем диапазоне токов из всех исследованных нами значений давления. Среднее значение нормальной плотности тока $j_n = 0,7$ мА/см². Если продолжать повышать ток, то разряд переходит в аномальный режим. Нужно отметить, что чем больше давление азота в камере, тем меньше могут быть размеры разрядных пятен, при которых поддерживается нормальный режим постоянного тока.

При больших значениях давлений газа нормальный режим наблюдается в более широком диапазоне разрядных токов. Стабильность плазменного столба в нормальном режиме обусловлена наличием радиального поля, которое формируется на границе плазменного столба вблизи катода благодаря неоднородности силовых линий электрического поля в этой области [16, 17]. Под действием этого поля ионы на границе плазма-слой вытесняются из прикатодной области разряда, а электроны стремятся к центру плазменного шнура, тем самым, стабилизируя разряд. Поскольку плотность заряженных частиц при большем давлении выше, в таких условиях стабилизация плазменного шнура осуществляется легче. Кроме того, при повышенном давлении газа амбиполярный уход заряженных частиц из плазменного шнура ниже, что также позволяет нормальному режиму гореть в виде шнура небольшого диаметра.

Плотность тока в катодном слое (в случае, когда ионы движутся в слое, претерпевая столкновения с молекулами нейтрального газа, с постоянной подвижностью μ_i , не зависящей от их скорости) определяется соотношением [29]:

$$j = \frac{\mu_i V_c^2}{\pi d^3} (1 + \gamma), \quad (1)$$

где j – плотность разрядного тока, V_c – падение напряжения на катодном слое, d – толщина катодного слоя, γ – коэффициент ион-электронной эмиссии с поверхности катода. Из формулы (1) видно, что плотность тока в слое обратно пропорциональна толщине слоя в степени 3. На рис. 8 приведена фотография разрядного пятна постоянного тока, горящего в нормальном режиме, сделанная параллельно плоскости катода. Видно, что толщина катодного слоя в радиальном направлении не постоянна. Ее значение минимально в центре разрядного пятна нормального режима и увеличивается по мере приближения к краю пятна. Исходя из выражения (1), при увеличении толщины катодного слоя плотность тока разряда должна падать. Соответствующее поведение плотности тока наблюдалось в ходе данных экспериментов по изучению радиальной плотности тока нормального режима разряда (см. например рис. 7, $I_{dc} = 7,44$ мА). Таким образом, из соотношения (1) и наблюдаемых различных значений толщины катодного слоя при движении вдоль радиуса разрядного пятна нормального режима следует, что плотность тока должна быть максимальной в центре разрядного пятна и уменьшаться при приближении к его краю.

Для визуального наблюдения разрядного пятна нормального режима использовалась Т-образная разрядная

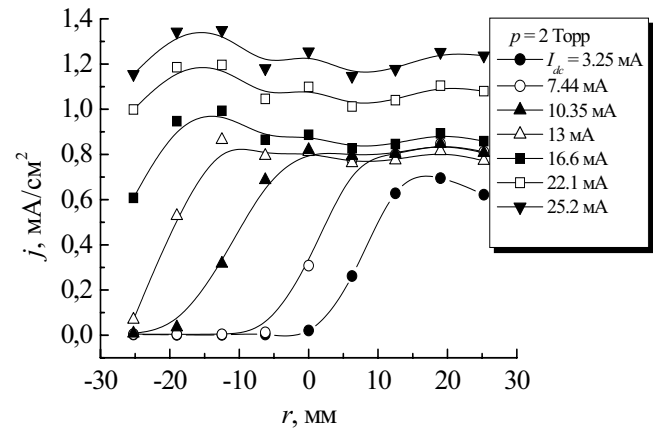


Рис. 7. Радиальные зависимости плотности тока для различных значений разрядного тока при давлении азота $p = 2$ Торр.

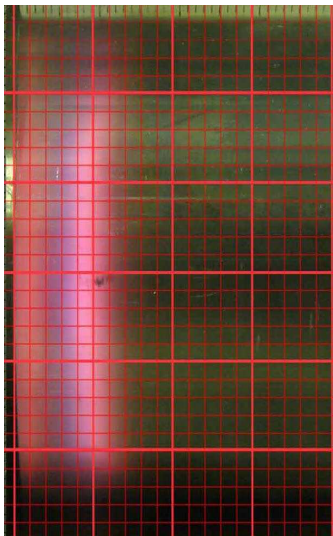


Рис. 8. Фотография разрядного пятна в нормальном режиме параллельно плоскости катода (катод слева).

камера (рис. 2). Через окошко Т-образной трубки производилось фотографирование свечения нормального режима вблизи катода (а именно, отрицательного свечения разряда постоянного тока) для различных давлений азота в камере. Расстояние между анодом и катодом составляло 400 мм. При выполнении каждого снимка фиксировалось значение постоянного тока разряда. Затем фотографии проходили предварительную обработку при помощи программы «Photoshop» (обрезались части снимка, выходящие за границы катода). Пример полученной и предварительно обработанной фотографии приведен на рис. 9а.

Затем программным образом вычислялась площадь, занимаемая разрядным пятном, соответствующая каждому фотоснимку. Погрешность при вычислении площади пятна составляла не более 15% и связана с тем, что довольно сложно определить границу пятна, особенно при низких давлениях азота, когда края разрядного пятна размытые (см. рис. 9б). При анализе фотографий учитывалась только та часть площади разрядного пятна, в пределах которой разрядное свечение наиболее интенсивное и распределено по поверхности пятна на катоде примерно однородно. Зная площадь, занимаемую разрядным пятном нормального режима на электроде S и соответствующее значение разрядного тока I , можем вычислить значение нормальной плотности тока j_n для каждого фотоснимка по формуле:

$$j_n = \frac{I}{S}. \quad (2)$$

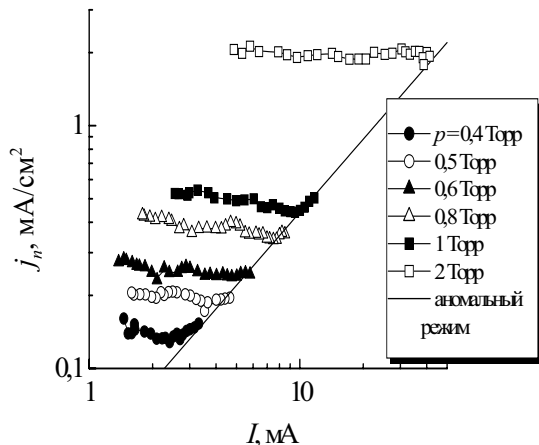


Рис. 10. Зависимость нормальной плотности тока от величины постоянного тока разряда для различных фиксированных значений азота, катод – магний, расстояние между электродами 400 мм.

электродами 50 мм, но и для расстояния 400 мм. Общепризнанным является мнение, что такой параметр, как j_n/p^2 (нормальная плотность тока, деленная на давление газа в квадрате), не зависит от величины разрядного тока в нормальном режиме [4, 5].

Для проверки данного утверждения была проведена следующая серия экспериментов. Из измеренных радиальных профилей плотности ионов в нормальном режиме в камере с коллекторами (см. рис. 1) и расстоянием между электродами 400 мм были взяты максимальные значения плотности тока для каждого из выбранных значений постоянного тока разряда, горящего в нормальном режиме, при различных фиксированных давлениях азота. Дополнительно был сделан ряд фотографий свечения нормального режима постоянного тока через смотровое окно Т-образной трубки. Расстояние между электродами также было 400 мм, катод – также, как и в случае с коллекторами, из нержавеющей стали, диаметр электродов в этих двух различных экспериментах был одинаков (56 мм). Полученные фотографии оцифровывались по описанной выше методике, и для каждой из них вычислялось значение нормальной плотности тока j_n . Затем для каждого

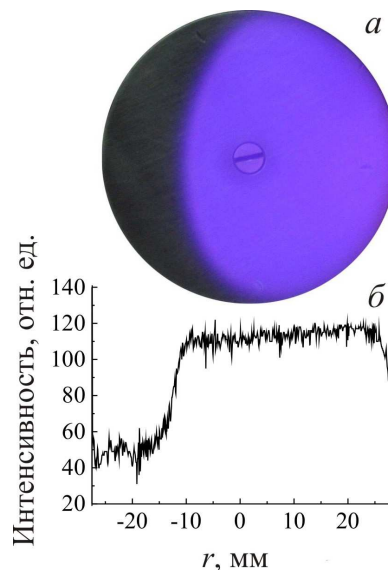


Рис. 9. Пример фотографии, полученной через смотровое окно Т-образной трубки и предварительно обработанной (а), и распределение интенсивности свечения по диаметру катода (б).

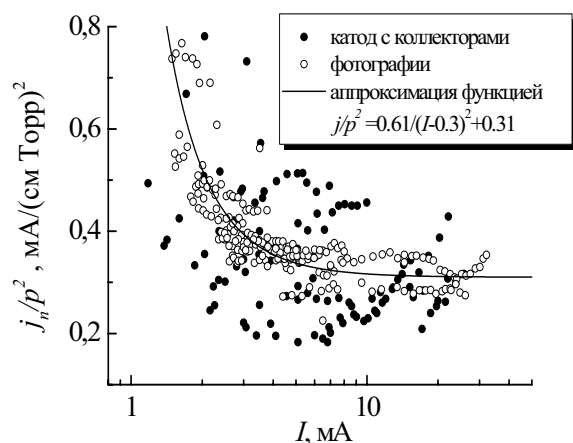


Рис. 11. Экспериментальная зависимость j_n/p^2 от постоянного тока разряда в азоте при $p = 0,4 \div 2$ Торр, полученная двумя различными методами, катод – нержавеющая сталь.

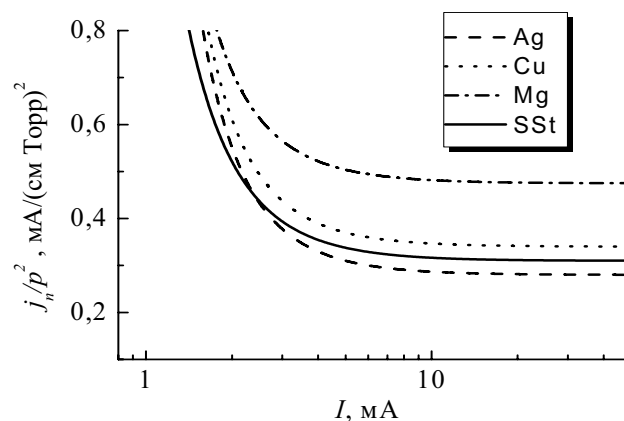


Рис. 12. Экспериментальные зависимости j_n/p^2 от постоянного тока разряда в азоте при $p = 0,4 \div 2$ Торр, полученные из фотографий свечения нормального режима для различных материалов катода.

эксперимента это значение было поделено на соответствующее давление азота. Зависимости j_n/p^2 от постоянного тока разряда I , полученные двумя различными методами приведены на рис. 11. На рис. 11 приведены значения j_n/p^2 в диапазоне давлений азота $p = 0,4 \div 2$ Торр. Мы видим, что значения j_n/p^2 , измеренные этими двумя методами, хорошо согласуются и могут быть аппроксимированы по методу наименьших квадратов функцией вида $j_n/p^2 = 0,61/(I-0,3)^2 + 0,31$. Функция именно такого вида была выбрана для того, чтобы наглядно показать, что величины j_n/p^2 в нормальном режиме разряда постоянного тока на самом деле зависят от величины тока разряда при давлениях азота меньше 2 Торр. Важно заметить, что значение j_n/p^2 , к которому асимптотически стремится наша функция при больших давлениях и токах разряда, по порядку величины полностью совпадает с данными, полученными экспериментально ранее другими авторами [2-4]. Например, в работе [2] для азота и катодов из железа и никеля приведено следующее значение $j_n/p^2 = 0,4$ mA/(cm·Torr)², а для катода из платины $j_n/p^2 = 0,38$ mA/(cm·Torr)². У нас же для азота и катода из нержавеющей стали получилось асимптотическое значение $j_n/p^2 \approx 0,32$ mA/(cm·Torr)². Следовательно, можно сделать вывод, что наши экспериментальные результаты не противоречат данным, полученным другими авторами, а дополняют их в область более низких давлений.

Из рис. 11 можно сделать вывод, что исследуемый нами диапазон давлений азота (от порогового давления появления нормального режима при $p \approx 0,3 - 0,4$ Торр до примерно $p \approx 2$ Торр) является переходным от случая отсутствия нормального режима к случаю сформировавшегося нормального режима с $j_n/p^2 = const$. В литературе отсутствуют результаты для данных условий. Этот переходный режим характеризуется тем, что в пределах него нормальная плотность тока, деленная на давление газа в квадрате j_n/p^2 , не остается постоянной величиной, а уменьшается с ростом разрядного тока и давления газа.

По-видимому, при низких давлениях газа из-за ухода частиц из области плазмы вследствие амбиполярной диффузии концентрация заряженных частиц в разряде понижается, и приложенной величины постоянного напряжения становится недостаточно для поддержания необходимой степени ионизации в разрядной плазме. Следовательно, чтобы не допустить погасания разряда, происходит небольшое повышение напряжения, а также при этом повышается плотность плазмы в центре разрядного пятна (и, соответственно, плотность тока на поверхность катода). При повышении давления газа диффузионные потери из плазмы уменьшаются, величина j_n/p^2 выходит на насыщение и перестает зависеть как от разрядного тока, так и от давления газа.

Общепризнано, что величины j_n/p^2 также зависят от материала катода разрядной камеры при прочих одинаковых экспериментальных условиях. Для исследования этого факта нами были сделаны серии фотографий разряда в Т-образной трубке в азоте для различных материалов катода - нержавеющей стали (SSt), серебра (Ag), меди (Cu), магния (Mg). Для каждого из катодов было сделано порядка 300 фотографий, из которых затем вычислялась величина j_n/p^2 , а затем по методу наименьших квадратов проводилась аппроксимация данных (в нашем случае наиболее подходящей функцией оказалась $j_n/p^2 = a/(I-b)^2 + c$, где a , b , c – произвольные коэффициенты). Полученные нами аппроксимационные кривые приведены на рис. 12. Мы видим, что для всех исследованных нами материалов катодов величина j_n/p^2 в нормальном режиме разряда постоянного тока не является постоянной, как предполагалось ранее, а увеличивается с уменьшением разрядного тока и уменьшением давления газа (азота) в камере.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе показано, что существует переходный диапазон давлений газа, в пределах которого нормальная плотность тока, деленная на давление газа в квадрате j_n/p^2 , уменьшается с ростом разрядного тока и давления газа, а не остается постоянной величиной. Этот диапазон со стороны низких давлений ограничен пороговым давлением появления нормального режима (при $p \approx 0,3 - 0,4$ Торр) и простирается до примерно $p \approx 2$ Торр. Установлено, что в нормальном режиме радиальные профили плотности тока имеют максимум в

центре разрядного пятна и убывают к краям пятна, а в аномальном режиме – имеют практически однородный профиль для фиксированного значения разрядного тока. Используя фотометрическую методику, вычислены значения плотности тока разряда в нормальном режиме в азоте. Показано хорошее соответствие экспериментальных значений нормальной плотности тока, полученных методами фотометрии и непосредственным измерением при помощи катода с коллекторами. Проведены экспериментальные измерения нормальной плотности тока для различных материалов катодов в азоте низкого давления. Показаны небольшие различия между асимптотическими значениями нормальной плотности тока, деленной на давление азота в квадрате j_n/p^2 , для разных материалов катодов. Во всех экспериментах при давлениях азота менее 2 Торр наблюдалось увеличение значения параметра j_n/p^2 при уменьшении давления газа. Значения, к которым асимптотически приближается j_n/p^2 , в области более высоких давлений хорошо соответствуют данным, полученным ранее другими авторами. Это указывает на то, что при низких давлениях (вблизи порога появления нормального режима), закон подобия $j_n/p^2 = const$ не выполняется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиофизическая электроника // Под ред. Капцова Н.А. Из-во Московского университета, 1960. - 561 с.
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. - 592 с.
3. Грановский В.Л. Электрический ток в газах. - М.: Наука, 1971. - 490 с.
4. Чистяков П.Н. Законы подобия при нормальном тлеющем разряде в неоне и аргоне // ЖТФ. - 1971. - Т. 41, № 8. - С. 1672-1674.
5. Королев Ю.Д. Интерпретация явления постоянства плотности тока в нормальном тлеющем разряде // ЖТФ. – 1987. – Т. 57, № 2. -С. 380-382.
6. Fujii K. Transition mechanism from Townsend discharge to normal glow discharge// J. Appl. Phys. – 1973. - Vol. 13, № 3. - P. 573-574.
7. Ward A. Calculations of Cathode-Fall Characteristics // J. Appl. Phys. – 1962. - Vol. 33, № 9. – P. 2789-2796.
8. Cicala G., De Tommaso E., Raino A.S., Lebedev Yu. A., Shakhmatov V.A. Study of positive column of glow discharge in nitrogen by optical emission spectroscopy and numerical simulation // Plasma Sources Sci. Technol. – 2008. – Vol. 18. – P. 1-15.
9. Nemchinsky V. A method to decrease the normal current density at the cathode of a glow discharge // J. Phys. D: Appl. Phys. - 2003. - Vol. 26 -. – P. 643-646.
10. Чистяков П.Н. Некоторые зависимости нормального катодного падения потенциала в инертных газах // ЖТФ. – 1970. - Т. 40, № 2. - С. 303-304.
11. Tran N. A., Marode E. Monte Carlo simulation of electrons within the cathode fall of a glow discharge in helium // J. Appl. Phys. – 1977. - Vol. 10. – P. 2317-2328.
12. Kulikovskiy A.A. Hydrodynamic description of electron multiplication in the cathode region: elementary beams model // J. Phys. D: Appl. Phys. - 1991. – Vol. 24. –P. 1954-1963.
13. Ward A. Effect of space charge in cold-cathode gas discharges // Phys. Rev. – 1958. - Vol. 112, № 6. – P. 1852-1857.
14. Vlasov V. V., Gyseva L. G. and Klarfeld B. N. Transition of one type glow discharge into // Oxford Contrib. Papers, 10th ICPIG. - 1971. – P. 98.
15. Guntherschulze A. Zusammenhang zwischen stromdichte und kathodenfall der Glimmentladung bei verwendung einer schutzringkathode und korrektion der temperaturerhöhung des gases // Mitteilung aus der Physikalisch - Technischen Reichsanstalt. - 1928. – B.26, H.4. – S. 358-379.
16. Мелехин В.Н., Наумов Н.Ю. О природе катодного пятна нормального тлеющего разряда // ЖТФ. – 1986. - Т. 12, № 2. – С. 99-103.
17. Райзер Ю.П., Суржииков С.Т. Еще раз о природе эффекта нормальной плотности тока на катоде тлеющего разряда // ЖТФ. – 1987. - Т.13, № 8. - С. 452-455.
18. Engel A., Emeleus K. G. and Kennedy M. Radial coherence of the normal glow discharge // J. Appl. Phys. – 1972. - Vol.42. – P. 191-192.
19. Boeuf J.-P. A two-dimensional model of dc glow discharges // J. Appl. Phys. – 1988. - Vol. 63, № 5, - P. 1342-1349.
20. Ohuchi M., Kubota T., Monte Carlo simulation of electrons in the cathode region of the glow discharge in helium // J. Appl. Phys. – 1983. - Vol. 16. – P. 1705-1714.
21. Hartog E.A. Dought D.A. Laser optogalvanic and fluorescence studies of the cathode region of a glow discharge // Phys. Rev. – 1988. - Vol. 38, № 9. – P. 2471-2474.
22. Goto M., Kondon Y., Monte Carlo simulation of normal and abnormal glow discharge plasmas using the limited weight probability method // Jpn. J. Appl. Phys. – 1998. – Vol. 37. – P. 308-312
23. Лисовский В.А., Яковин С.Д. Характеристики катодного слоя тлеющего разряда низкого давления в аргоне и азоте. // Письма в ЖТФ. – 2000. - Т. 26, вып. 19. - С. 88-94.
24. Лисовский В.А., Харченко Н.Д. Условия появления нормального режима разряда постоянного тока низкого давления // ФИП. – 2006. – Т. 4, № 3-4. – С. 184-186.
25. Кудрявцев А.А., Цендин Л.Д. Неустойчивость Таунсендовского разряда на правой ветви кривой Пашена // Письма в ЖТФ. – 2002. - Т. 28, вып. 24. - С. 36-42.
26. Кудрявцев А.А., Морин А.В., Цендин Л.Д. Роль нелокальной ионизации в формировании коротких тлеющих разрядов // ЖТФ. – 2008. – Т.78, № 8. – С. 71-82.
27. Мойжес Б.Я., Немчинский В.А. К теории катодного слоя тлеющего разряда // ЖТФ. – 1989. – Т. 59, № 4. – С. 22-29.
28. Lister G. Low – pressure gas discharge modeling // J. Appl. Phys. – 1992. – Vol. 25. - P. 1649-1680.
29. Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. - New York: Wiley. – 1994. – 572 p.