

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДИАМЕТРАХ АНОДА

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

*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина
Украина*

Поступила в редакцию 15.05.2010

В данной работе исследовано влияние диаметра анода на зажигание и вольт-амперные характеристики тлеющего разряда постоянного тока. Показано, что уменьшение диаметра анода приводит к смещению кривых зажигания в область более высоких давлений газа и пробойных напряжений. Такое поведение кривых зажигания связано, по-видимому, с увеличением площади диэлектрических стенок и потерь заряженных частиц вследствие диффузии при небольших диаметрах анода. Показано, что при уменьшении диаметра анода повышается напряжение погасания разряда. Получено, что разрядный ток растет медленнее с повышением напряжения на электродах для анодов малого диаметра. В нормальном режиме горения для небольших анодов уменьшение разрядного тока сопровождается значительным повышением напряжения на электродах. Вблизи малого анода наблюдается яркое анодное свечение во всем исследованном диапазоне давлений газа, что указывает на наличие большого положительного падения напряжения на анодном слое.

Ключевые слова: разряд постоянного тока, пробой газа, вольт-амперные характеристики, анод, анодный слой.

У цій роботі було досліджено вплив діаметра аноду на запалювання та вольт-амперні характеристики тліючого розряду постійного струму. Показано, що зменшення діаметра аноду призводить до зсуву кривих запалювання в область більш високого тиску газу і пробійних напруг. Така поведінка кривих запалювання пов'язана, мабуть, із збільшенням площі діелектричних стінок та втрат заряджених частинок внаслідок дифузії при невеликих діаметрах аноду. Показано, що при зменшенні діаметра аноду збільшується напруга згасання розряду. Отримано, що розрядний струм зростає повільніше із збільшенням напруги на електродах для анодів малого діаметру. У нормальному режимі горіння для невеликих анодів зменшення розрядного струму супроводжується значним збільшенням напруги на електродах. Це пов'язано, мабуть, із збільшеними втратами заряджених частинок внаслідок амбіполярної дифузії із-за звуження розрядного шнуру при русі електронів до аноду маленького діаметру. Показано, що поблизу малого аноду спостерігається яскраве анодне світіння у всьому дослідженому діапазоні тиску газу, що вказує на наявність великої позитивної напруги на анодному шарі.

Ключові слова: розряд постійного струму, пробій газу, вольт-амперні характеристики, анод, анодний шар.

This paper studies how an anode diameter value affects ignition and CVC of the dc glow discharge. The decrease in anode diameter is shown to cause a shift of ignition curves to higher gas pressure and breakdown voltage values. Probably this behavior of breakdown curves is associated with the increase of the dielectric wall area and charged particle loss due to diffusion with moderate anode diameter values. Decreasing the anode diameter is shown to increase the discharge extinction voltage. The discharge current is found to grow slower with the voltage across the electrodes increasing for small anode diameter values. In the normal mode of burning for moderate anodes the decrease in the discharge current is accompanied with a considerable increase of the voltage across the electrodes. Probably it is associated with an enhanced escape of charged particles due to ambipolar diffusion caused by discharge column narrowing when electrons are moving to the anode of small diameter. A bright anode glow is found to be present around the small anode in the total range of gas pressure under study, thus indicating the availability of a large positive voltage drop across the anode sheath.

Keywords: direct current discharge, gas breakdown, anode, anode layer.

ВВЕДЕНИЕ

Тлеющий разряд постоянного тока широко используется в таких приборах тлеющего разряда, как газоразрядные стабилизаторы на-

пряжения (стабилитроны), а также выпрямители с тлеющим разрядом и др [1]. Для того чтобы корректно применять тлеющий разряд, необходимо знать условия его существования

и количественные характеристики в различных газах, при различных давлениях газов и размерах электродов, поэтому этот вопрос уже давно исследуется рядом научных групп [2, 3]. В большинстве работ тлеющий разряд зажигался между плоскими параллельными электродами равной площади. При этом площадь анода, как правило, была равна площади поперечного сечения разрядной трубки. В настоящее время в литературе имеются лишь результаты о влиянии формы анода на знак и величину анодного падения напряжения в длинной разрядной трубке в парах ртути [4, 5]. Однако, практически нет данных, которые показывают влияние размеров анода на параметры плазмы разряда постоянного тока в коротких разрядных трубках. В связи с этим нашей целью было изучить влияние размеров плоского анода на зажигание и вольт-амперные характеристики тлеющего разряда постоянного тока.

У анода, замыкающего положительный столб газового разряда, в зависимости от условий наблюдается либо положительный скачок потенциала, достигающий величины нескольких единиц, а иногда нескольких десятков вольт, либо отрицательный, не превышающий в обычных условиях 3 – 4 В. При положительном анодном падении напряжения на аноде присутствует свечение в виде тонкой пленки. С повышением давления эта светящаяся пленка теряет свою однородность; на ней возникают более яркие выпуклые образования – “пятна”, имеющие полусферическую форму. При отрицательном анодном падении светящаяся пленка отсутствует. Знак и величина анодного падения зависят от формы как самого анода, так и окружающих его стенок разрядного пространства, от рода и давления газа, силы тока и от других разрядных условий.

Знак и величина анодного падения являются тем регулятором, который поддерживает концентрацию заряженных частиц перед анодом на уровне, обеспечивающем подведение к нему разрядного тока. При отрицательном анодном падении ионы уходят на анод, понижая концентрацию заряженных частиц в плазме. При положительном анодном падении ионы не только не могут уходить на анод,

но их концентрация перед анодом дополнительно возрастает за счет ионизации газа в слое у анода электронами, ускоренными в пределах анодного падения [3].

Отрицательное анодное падение образуется у полого анода, представляющего собой цилиндр с внутренней поверхностью, имеющей диаметр, равный диаметру разрядной трубки [4]. У малых плоских анодов, занимающих только небольшую часть сечения разрядной трубки, всегда возникает положительное анодное падение. Авторы работы [5] показали, что полый и малый полусферический аноды имеют во всех случаях, соответственно, отрицательный и положительный знаки анодного падения. Плоский анод при высоких разрядных токах имеет в основном отрицательное анодное падение. Однако при низких токах анодное падение становится положительным и равным 6 – 8 В. Зондовыми измерениями показано, что все электрические и световые явления у анода определяются условиями возникновения и исчезновения положительных ионов в пространстве перед анодом, то есть процессами, от которых зависят распределения концентрации заряженных частиц и потенциала в анодном пространстве.

В работе [6] экспериментально исследована анодная область в газовом разряде при низких давлениях паров ртути. Показано, что понижение ионизирующей способности электронов, вызванное отбором наиболее быстрых электронов на вспомогательный электрод, расположенный вблизи поверхности плоского анода, приводит к уменьшению частоты ионизации молекул газа и, следовательно, к понижению концентрации положительных ионов. Отрицательный объемный заряд электронов, которые переносят разрядный ток к аноду, в этом случае не может быть скомпенсирован и анодное падение становится положительным.

Как показано в работе [7], анодные пятна образуются на однородной пленке анодного свечения, когда положительное анодное падение и давление газа начинают превышать некоторые определенные значения. С повышением давления число пятен быстро возрастает, а их размеры уменьшаются.

В литературе имеется большое количество теоретических работ, посвященных численному моделированию процессов в анодном слое при различных разрядных условиях (см., например, работы [8 – 15]).

Однако в рассмотренных выше статьях, как правило, исследования проводились с плоскими анодами, полностью перекрывающими сечение разрядной трубки. Только в статьях [4, 5] изучено влияние формы анода на величину и знак падения напряжения на прианодном слое. В то же время, в литературе отсутствуют данные о влиянии размеров плоского анода на зажигание и вольт-амперные характеристики тлеющего разряда.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для изучения влияния размеров плоского анода на зажигание и вольт-амперные характеристики тлеющего разряда постоянного тока использовались две разрядные камеры, схемы которых показаны на рис. 1. В первом случае (рис. 1а) кварцевая трубка имела внутренний диаметр 56 мм. Диаметр катода был равен 55 мм. Эксперименты проводились с плоскими анодами, диаметр которых был равен 55 мм, 5 мм, 3 мм и 0,8 мм. В случае анодов малой площади сечение трубки перекрывалось диэлектрической пластиной диаметром 55 мм, через отверстие в которой вставлялся анод, находящийся с пластиной в одной плоскости. Расстояние между электродами было 20 мм. Азот подавался в камеру с помощью системы напуска газа СНА-1. Для регистрации давления газа в диапазоне от 10^{-3} Торр до атмосферного мы использовали вакуумный термоэлектрический датчик 13ВТ3-003. Откачка газа производилась с помощью форвакуумного насоса, что обеспечивало предельный вакуум порядка 10^{-4} Торр. Источник постоянного напряжения подключался к катоду, а анод был заземлен. 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. Эксперименты проводились при давлениях азота $p = 0,1 – 10$ Торр в диапазоне постоянного напряжения $U_{dc} \leq 3000$ В.

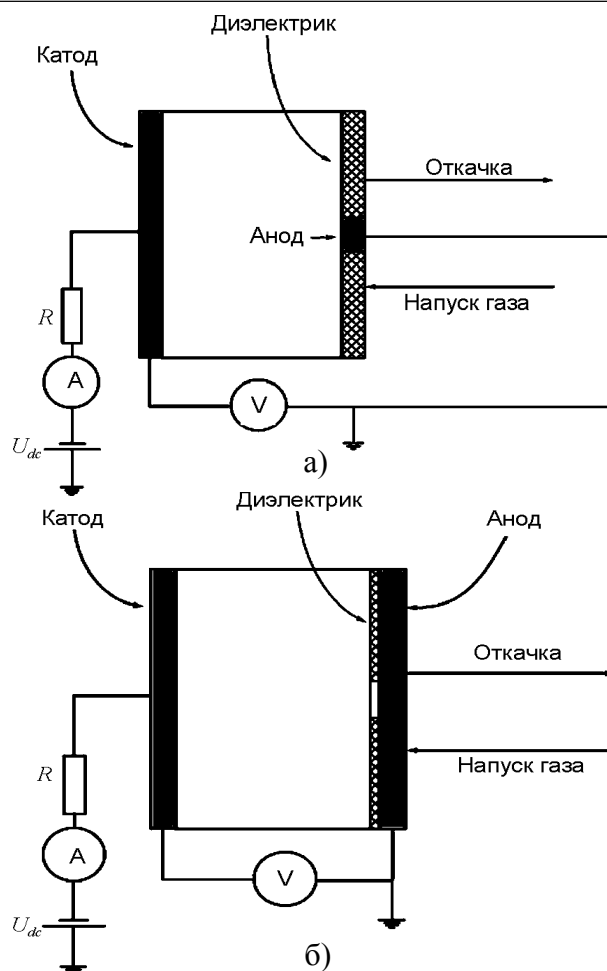


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Во втором случае (рис. 1б) кварцевая трубка имела внутренний диаметр 100 мм. Электроды полностью перекрывали все сечение разрядной трубки. При проведении экспериментов на аноде располагалась диэлектрическая пластина толщиной 1 мм, в центре которой было сделано отверстие необходимого диаметра. Таким образом, собирающая поверхность анода ограничивалась данным отверстием. Эксперименты были выполнены с диаметрами анодов 100 мм, 10 мм и 5 мм. Расстояние между электродами было равно 32 мм. В этом случае исследования проводились с аргоном в диапазоне давлений $p = 0,01 – 10$ Торр.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА АНОДА НА ЗАЖИГАНИЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для зажигания тлеющего разряда необходимо, чтобы скорость рождения заряженных частиц вследствие ионизации молекул газа электронным ударом и вторичной ион-элект-

ронной эмиссии из поверхности катода была равна скорости потерь на стенках трубки вследствие диффузии и дрейфового ухода на электроды. Этот баланс должен выполняться в разрядных камерах любой геометрии.

На рис. 2 приведены кривые зажигания тлеющего разряда в азоте в камере, показанной на рис. 1а, измеренные для различных диаметров анода.

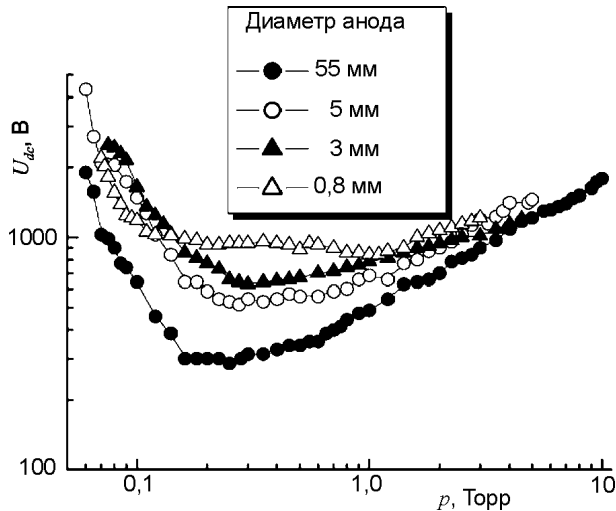


Рис. 2. Кривые зажигания разряда постоянного тока в азоте при диаметрах анода 0,8 мм, 3 мм, 5 мм, 55 мм.

Из рис. 2 видно, что наилучшие условия для зажигания разряда наблюдаются в случае, когда анод перекрывает все поперечное сечение разрядной трубки (кривая для диаметра анода 55 мм). Минимум этой кривой зажигания находится при давлении азота 0,25 Торр и напряжении 286 В. При уменьшении диаметра анода кривые зажигания смещаются в область более высоких давлений газа и пробойных напряжений. Так, для анода диаметром 5 мм минимум кривой зажигания наблюдается при 0,3 Торр и 508 В, а для анода диаметром 3 мм координаты минимума стали 0,33 Торр и 632 В. При уменьшении диаметра анода увеличивается площадь диэлектрических стенок, на которые могут уходить электроны вследствие диффузии. Для компенсации этих потерь нужно обеспечить более высокую скорость ионизации молекул газа электронами. Повышение давления увеличивает частоту ионизации и одновременно уменьшает скорость диффузионного ухода заряженных частиц на стенки. Поэтому уменьшение диаметра анода привело, во-первых, к повышению пробойного напряжения, во-вторых,

к смещению кривой зажигания в область более высоких давлений газа. Подобное поведение кривых зажигания наблюдается при уменьшении диаметра разрядной трубки, а также снижении эмиссионной способности катода (что было ранее показано в статьях [16 – 18]). Представляет интерес измерить кривые зажигания для анодов очень маленького диаметра в широком диапазоне давлений газа. Уменьшение диаметра анода приводит не только к повышенному уходу заряженных частиц на стенки трубки и окружающую анод диэлектрическую поверхность, но и к усилению ионизации вблизи анода. В разрядной камере с малым анодом распределение электрического поля становится сильно неоднородным, вблизи поверхности анода напряженность электрического поля значительно увеличивается. Поэтому на кривых зажигания для очень малых анодов могут появиться дополнительные особенности, которые не наблюдаются при использовании анодов большего диаметра.

Измерения кривых зажигания тлеющего разряда в аргоне, выполненные в камере, показанной на рис. 1б, дали аналогичные результаты (см. рис. 3). В этой разрядной камере диаметр анода регулировался диаметром отверстия, сделанного в тонкой диэлектрической пластине, которой покрывался анод. Кривая зажигания для анода, не покрытого диэлектрической пластиной, имеет в минимуме наименьшее давление газа и пробойное напряжение. Для анода, накрытого пластиной с отверстием маленького диаметра, кривая

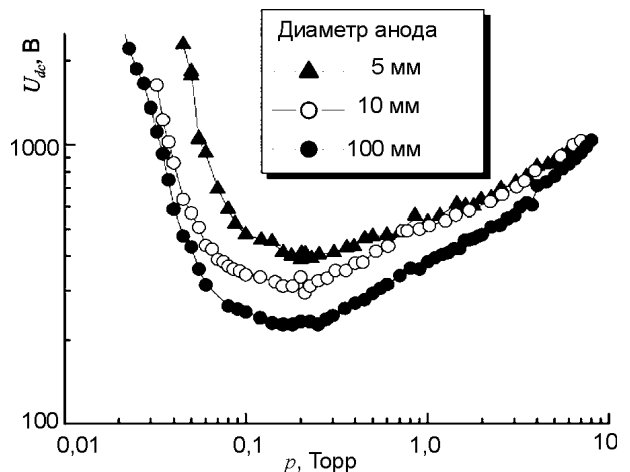


Рис. 3. Кривые зажигания разряда постоянного тока в аргоне при диаметрах анода 5 мм, 10 мм, 100 мм.

зажигания смещается в область повышенных давлений газа и пробойных напряжений.

ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА АНОДА НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ (ВАХ) ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Целью данного эксперимента было измерить вольт-амперные характеристики тлеющих разрядов в азоте и аргоне для различных камер и нескольких диаметров анода. Результаты исследований приведены на рис. 4 – 6.

На рис. 4 представлены вольт-амперные характеристики разрядов в азоте в широком диапазоне давлений для разрядной камеры, показанной на рис. 1а.

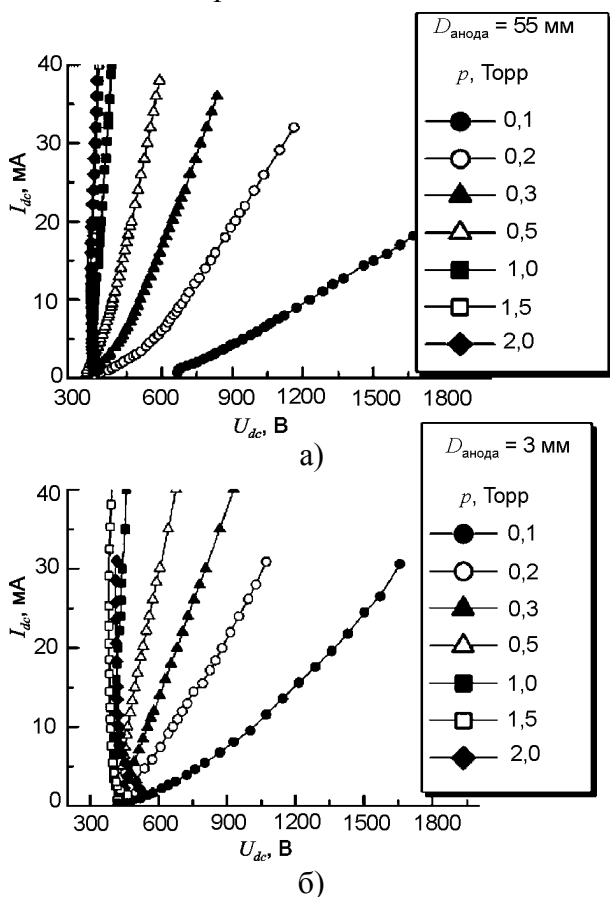


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда при различных давлениях азота и диаметрах анода 55 мм – а) и 3 мм – б). Диаметр трубки 55 мм.

Как видно из рис. 4, при давлениях азота 0,1 – 0,3 Торр разряд горит только в аномальном режиме. Начиная с давления 0,5 Торр и выше, при низких разрядных токах разрядное пятно занимает только часть поверхности катода и наблюдается нормальный режим,

который с ростом тока переходит в аномальный. Уменьшение диаметра анода привело к повышению наименьшего напряжения поддержания разряда.

Вольт-амперные характеристики разрядов в аргоне при различных давлениях представлены на рис. 5. Исследования были проведены в разрядной камере, показанной на рис. 1б. Поведение вольт-амперных характеристик в аргоне и азоте оказалось аналогичным.

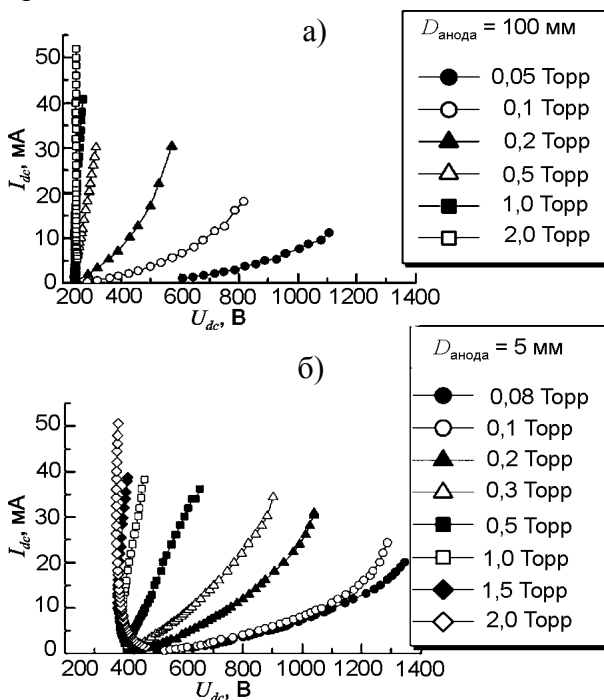


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда в аргоне при различных давлениях и диаметрах анода 100 мм – а) и 5 мм – б). Диаметр трубки 100 мм.

На рис. 6 сравниваются вольт-амперные характеристики разряда в аргоне, измеренные при одинаковых давлениях газа и различных диаметрах анода. Из рис. 6 видно, что при давлении аргона $p = 0,1$ Торр вольт-амперные характеристики для диаметров анода 100 мм и 5 мм качественно подобны, но уменьшение диаметра анода привело к повышению напряжения погасания разряда, а также к меньшей скорости роста тока при увеличении напряжения на электродах. Для давления аргона $p = 0,5$ Торр при наименьших разрядных токах наблюдается нормальный режим горения, то есть с понижением тока разрядное пятно сжимается, занимая только часть поверхности катода. При давлении $p = 2$ Торр в широком диапазоне токов разряд горит в нормальном режиме как для маленького, так и

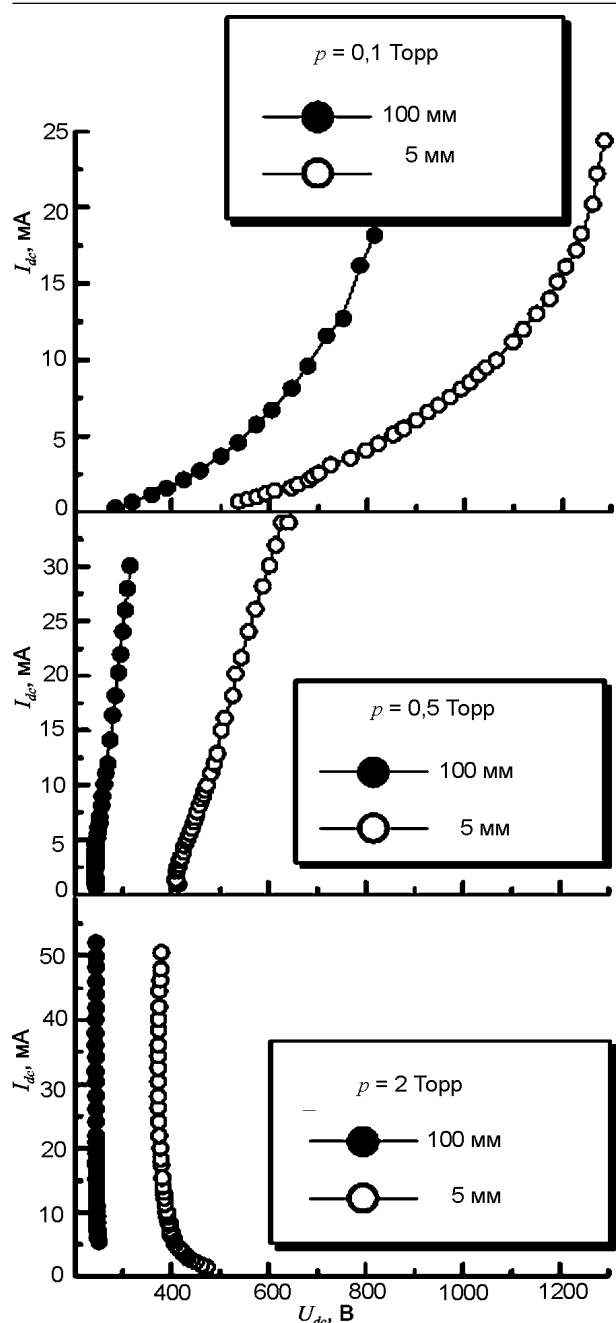


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда в аргоне при давлениях 0,1 Торр, 0,5 Торр, 2 Торр и диаметрах анода 100 мм и 5 мм. Диаметр трубки 100 мм.

для больших анодов. Однако для анода диаметром 5 мм понижение разрядного тока сопровождается значительным ростом напряжения на электродах. Для анода диаметром 100 мм этот эффект выражен гораздо слабее. Обычно разрядный шнур нормального режима тлеющего разряда, горящего между электродами большой площади, на аноде занимает большую площадь, чем на катоде. Но при диаметре анода 5 мм ситуация обратная, т.е. разрядный шнур на аноде ограничен его

площадью и не может расширяться, а при приближении к катоду диаметр шнура увеличивается. В случае электродов большой площади расширение плазменного шнура вблизи анода вызвано амбиполярной диффузией заряженных частиц. И для компенсации потерь электронов из разрядного шнура малого диаметра напряжение на электродах должно быть более высоким. В случае анода маленького диаметра сужение разрядного шнура при движении электронов к аноду приводит к их повышенному уходу вследствие амбиполярной диффузии. Этим и можно объяснить значительный рост напряжения на электродах при понижении тока нормального режима тлеющего разряда с малым анодом.

Визуальные наблюдения тлеющего разряда в аргоне при различных давлениях и диаметре анода 5 мм показывают, что при низком давлении (0,1 Торр) разряд горит в аномальном режиме, заполняя всю поверхность катода. Весь разрядный промежуток занят катодным слоем (параллельным поверхности катода) и отрицательным свечением, диффузно заполняющим оставшуюся часть зазора между электродами. При всех исследованных давлениях аргона вблизи малого анода наблюдается яркое анодное свечение. Как было ранее показано в работе [5], вблизи малого анода формируется анодный слой с положительным падением напряжения, чтобы подвести к поверхности анода разрядный ток. В случае анода, заполняющего все сечение разрядной трубки, анодное свечение наблюдается только при достаточно больших давлениях, когда может при небольших разрядных токах появиться нормальный режим горения, а при низких давлениях анодное свечение не наблюдается. При более высоких давлениях аргона (1 Торр и выше) разряд может гореть как в нормальном, так и в аномальном режиме.

Разрядное пятно, как правило, в нормальном режиме располагается не в центре катода, а на его периферии, вблизи стенки разрядной трубки. Из плазменного шнура нормального разряда заряженные частицы уходят в бестокую область вследствие амбиполярной диффузии, где и рекомбинируют. Если плазменный шнур располагается вблизи края

катода, то заряженные частицы поступают на стенку трубки, которая при этом приобретает отрицательный плавающий потенциал. Это приводит к тому, что потери заряженных частиц на стенке трубки уменьшаются, т.к. отрицательно заряженная стенка отталкивает медленные электроны обратно в плазму. Поэтому нормальный режим тлеющего разряда предпочитает гореть не в центре катода, а вблизи его края.

ВЫВОДЫ

1. В данной работе были измерены кривые зажигания тлеющего разряда постоянного тока. Показано, что наилучшие условия для зажигания разряда наблюдаются в случае, когда анод перекрывает все поперечное сечение разрядной трубки (кривая для диаметра анода 55 мм). Уменьшение диаметра анода привело к смещению кривых зажигания в область более высоких давлений газа и пробойных напряжений. При небольших диаметрах анода увеличиваются площадь диэлектрических стенок и потери заряженных частиц вследствие диффузии. Поэтому при уменьшении диаметра анода повышается пробойное напряжение, а кривые зажигания смещаются в область более высоких давлений газа.
2. Показано, что уменьшение диаметра анода привело к повышению напряжения погасания разряда.
3. Получено, что чем меньше диаметр анода, тем ниже скорость роста тока с увеличением напряжения на электродах. В нормальном режиме горения для анода небольшого диаметра понижение разрядного тока сопровождается значительным ростом напряжения на электродах. По-видимому, это связано с повышенным уходом заряженных частиц вследствие амбиполярной диффузии из-за сужения разрядного шнура при движении электронов к аноду маленького диаметра.
4. Во всем исследованном диапазоне давлений газа вблизи малого анода наблюдается яркое анодное свечение. Это указывает на наличие большого положительного падения напряжения на анодном слое.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиофизическая электроника/Под ред. Капцова Н.А. – Из-во Московского университета, 1960. – С. 470-471.
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. Клярфельд Б., Первова Л. Отрицательные и положительные анодные падения в разряде низкого давления//ЖТФ. – 1945.– Т. 15, № 9. – С. 640-644.
5. Клярфельд Б.Н., Неретина Н.А. Анодная область в газовом разряде при низких давлениях. I. Влияние формы анода на знак и величину анодного падения//ЖТФ. – 1958. – Т. 28, № 2. – С. 296-315.
6. Неретина Н.А., Клярфельд Б.Н., Анодная область в газовом разряде при низких давлениях. II. Роль температуры электронов плазмы, температуры поверхности анода и коэффициента аккомодации молекул на аноде//ЖТФ. – 1959. – Т. 29, № 1. – С. 15-23.
7. Клярфельд Б.Н., Неретина Н.А. Анодная область в газовом разряде при низких давлениях. III. Возникновение на аноде дополнительных плазм (анодных пятен)//ЖТФ. – 1960. – Т. 30, № 2. – С. 188-198.
8. Пашкин С.В. Об анодной области высоковольтного диффузного разряда при средних давлениях//ТВТ.–1976.–Т. 14, № 3. – С. 638-639.
9. Дыхне А.М., Елкин Н.Н., Напартович А.П., Таран М.Д., Таран Т.В. Численное исследование прианодной неустойчивости тлеющего разряда в электроотрицательном газе//Физика плазмы. – 1984. – Т. 10, № 3. – С. 627-632.
10. Голубовский Ю., аль-Хават Ш., Цендин Л. Распределение электронов в прианодной области слаботокового разряда в неоне//ЖТФ. – 1987. – Т. 57, № 7. – С. 1285-1291.
11. Голубовский Ю.Б., Некучаев В.С., Пономарев Н.С. Запертые и свободные электроны в прианодной области стратифицированного разряда//ЖТФ.– 1998.– Т. 68, № 3.– С. 25-32.
12. Jenista J., Heberlein J.V.R., Pfender E. Numerical model of the anode region of high-current electric arcs//IEEE Trans. on Plasma Sci. – 1997. – Vol. 25, No. 5. – P. 883-890.
13. Wilke C., Porohova I., Dinklage A., Golubovskii Yu.B. Electron distribution function in the anode region of inert gas discharges at low pressures and current//J. Phys. D: Appl. Phys. – 1999. – Vol. 32, No. 23. – P. 3025-3031.

14. Islamov R. Sh. Physical model of anode glow patterns in elevated-pressure gas discharges// Physical review. – 2001. – Vol. 64, No. 4. – P. 046405 (1-13).
15. Loffhagen D., Sigener F., Winkler R. Study of the electron kinetics in the anode region of a glow discharge by a multiterm approach and Monte Carlo simulations// . Phys. D: Appl. Phys. – 2002. – Vol. 35, No. 14 – P. 1786-1776.
16. Лисовский В.А., Яковин С.Д. Модифицированный закон Пашена для зажигания тлеющего разряда в инертных газах//ЖТФ. – 2000. – Т. 70, № 6. – С. 58-62.
17. Лисовский В.А., Яковин С.Д. Закон подобия при пробое газа низкого давления в однородном постоянном электрическом поле//Письма в ЖЭТФ. – 2000. – Т. 72, № 2. – С. 49-53.
18. Lisovskiy V.A., Yakovin S.D., Yegorenkov V.D. Low-pressure gas breakdown in uniform dc electric field//J. Phys. D: Appl. Phys. – 2000. – Vol. 33, No. 21. – P. 2722-2730.