

УДК 533. 915

## ЗАЖИГАНИЕ И РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОЛЫМ КАТОДОМ

**В.А. Лисовский<sup>1,2</sup>, И.А. Богодельный<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Харьковський національний університет імені В.Н. Каразіна

61022, Харків, пл. Свободи 4, Україна

<sup>2</sup> Научний фізико-технологічний центр

61022 Харків, пл. Свободи 6, Україна

E-mail: [lisovskiy@yahoo.com](mailto:lisovskiy@yahoo.com)

Received 15 October 2012, accepted 12 November 2012

В данной работе были измерены кривые зажигания тлеющего разряда постоянного тока с полым и плоским катодами. Показано, что при низких давлениях ( $p \leq 0,05$  Торр) газа совпадают левые ветви кривых зажигания для полого катода и для плоских электродов. При высоких давлениях ( $p \geq 0,3$  Торр) газа правая ветвь кривой зажигания разряда с полым катодом близка к кривой зажигания для расстояния между плоскими электродами, равному зазору между краем пластин полого катода и плоским анодом. Измерены вольт-амперные характеристики разряда с полым катодом. Показано, что при низких давлениях  $p < 0,1$  Торр газа разряд горит в высоковольтной (электронно-лучевой) форме с растущей вольт-амперной характеристикой, когда вторичные электроны ускоряются вдоль силовых линий электрического поля и формируют электронный пучок. При давлениях газа  $p \geq 0,1$  Торр разряд при низких токах горит в тлеющем режиме, в котором в полости между пластинами катода разрядное свечение практически отсутствует, а вольт-амперная характеристика разряда является растущей. При более высоких значениях тока разряд переходит в режим полого катода, заполняя пространство между пластинами, и имеет практически вертикальную вольт-амперную характеристику. Переход разряда из тлеющего режима в полый имеет гистерезисный характер. При давлениях газа  $p \sim 1$  Торр эффект полого катода исчезает, так как толщина катодного слоя становится малой по сравнению с зазором между пластинами катода. Показано, что когда коллекторы на аноде располагаются поперек зазора между пластинами полого катода, радиальный профиль электронного тока на анод в режиме электронного луча имеет резко выраженный максимум в области оси разрядной камеры. Профиль является более плоским, если цепочка коллекторов на аноде направлена вдоль полости катода. Повышение давления газа приводит к сильному рассеянию электронов пучка, при этом радиальные профили электронного тока на анод становятся примерно одинаковыми в обоих поперечных направлениях как в тлеющем, так и в полом режимах.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** тлеющий разряд постоянного тока, полый катод, зажигание разряда, вольт-амперные характеристики, радиальная структура, режимы горения

## IGNITION AND BURNING MODES OF DC HOLLOW CATHODE DISCHARGE

**V.A. Lisovskiy<sup>1,2</sup>, I.A. Bogodielnyi<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Kharkov National University

Svobody Sq.4, Kharkov 61022, Ukraine

<sup>2</sup> Scientific Center of Physical Technologies

Svobody Sq.6, Kharkov 61022, Ukraine

In this paper, we measured the breakdown curves of a dc glow discharge with hollow cathode and flat electrodes. It is shown that at low gas pressure ( $p \leq 0.05$  Torr), the left branches of the breakdown curves for the hollow cathode and the flat electrodes are identical. At high gas pressures ( $p \geq 0.3$  Torr), the right branch of the breakdown curve of the discharge with a hollow cathode is close to the breakdown curve for the distance between the plane electrodes, equal to the gap between the edge of the plates of the hollow cathode and flat anode. Current-voltage characteristics of the hollow cathode discharge were measured. It is shown that with low gas pressure  $p < 0.1$  Torr discharge is in the high-voltage (electron beam) form with ascending current-voltage characteristic, when secondary electrons are accelerated along electric field lines and form an electron beam. In the gas pressure range  $p \geq 0.1$  Torr the discharge at low current burns in the glow mode, in which the discharge glow is practically absent in the cavity between the plates of the cathode, and the current-voltage characteristic of the discharge is ascending. At higher current the discharge goes into the hollow cathode mode, filling the space between the plates, and it has an almost vertical current-voltage characteristic. The transition from a glow discharge mode into a hollow one possesses a hysteresis. At gas pressures  $p \sim 1$  Torr the hollow cathode effect disappears, since the thickness of the cathode layer is small compared with the gap between the plates of the cathode. It is shown that when the collectors are placed on the anode across the gap between the plates of the hollow cathode, the radial profile of the electron current to the anode in the mode of electron beam has a sharp maximum at the axis of the discharge chamber. The profile is flatter if the chain of collectors on the anode is directed along the cavity of the cathode. Increasing the gas pressure leads to a strong scattering of the electron beam, and the radial profiles of electron current to the anode are approximately the same in both transverse directions in the glow mode as well as in the hollow cathode one.

**KEY WORDS:** DC glow discharge, hollow cathode, discharge ignition, the current-voltage characteristics, the radial structure, burning modes

## ЗАПАЛЮВАННЯ ТА РЕЖИМИ ГОРІННЯ РОЗРЯДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПОРОЖНИСТИМ КАТОДОМ

**В.О. Лісовський<sup>1,2</sup>, І.А. Богодельний<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

61022, Харків, пл. Свободи 4, Україна

<sup>2</sup> Науковий фізико-технологічний центр

61022, Харків, пл. Свободи 6, Україна

У цій роботі були виміряні криві запалювання тліючого розряду постійного струму з порожнистим і плоским катодами.

Показано, що при низькому тиску газу ( $p \leq 0,05$  Торр) ліві гілки кривих запалювання для порожнистого катода і для плоских електродів співпадають. При високому тиску газу ( $p \geq 0,3$  Торр) права гілка кривої запалювання розряду з порожнистим катодом близька до кривої запалювання для відстані між плоскими електродами, рівній зазору між краєм пластин порожнистого катода і плоским анодом. Виміряні вольт-амперні характеристики розряду з порожнистим катодом. Показано, що при низькому тиску газу  $p < 0,1$  Торр розряд горить у високовольтній (електронно-променевої) формі зі зростаючою вольт-амперною характеристикою, коли вторинні електрони прискорюються вздовж силових ліній електричного поля і формують електронний пучок. При тиску газу  $p \geq 0,1$  Торр розряд при низькому струму горить у тліючому режимі, в якому в порожнині між пластинами катода розрядне світіння практично відсутнє, а вольт-амперна характеристика розряду є зростаючою. При більш високих значеннях струму розряд переходить у режим порожнистого катода, заповнюючи простір між пластинами, і має практично вертикальну вольт-амперну характеристику. Перехід розряду з тліючого режиму в порожнистий має гістерезисний характер. При тиску газу  $p \sim 1$  Торр ефект порожнистого катода зникає, тому що товщина катодного шару стає малою в порівнянні з зазором між пластинами катоду. Показано, що коли колектори на аноді розташовані уперек зазору між пластинами порожнистого катода, радіальний профіль електронного струму на анод в режимі електронного променя має різко виражений максимум в області осі розрядної камери. Профіль є більш плоским, якщо ланцюжок колекторів на аноді спрямовано вздовж порожнини катода. Підвищення тиску газу призводить до сильного розсіювання електронів пучка, при цьому радіальні профілі електронного струму на анод стають приблизно однаковими в обох поперечних напрямках як в тліючому, так і в порожнистому режимах.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** тліючий розряд постійного струму, порожнистий катод, запалювання розряду, вольт-амперні характеристики, радіальна структура, режими горіння

Тлеющий разряд с полым катодом широко используется во многих промышленных ионных приборах (стабилитроны и тиратроны), в газосветных лампах, спектральных источниках в атомно-абсорбционной спектроскопии, для накачки газоразрядных лазеров, сварки и плавки материалов электронной пушкой, для модификации поверхностей твердых тел (травление, осаждение тонких пленок), в аналитической и плазменной химии [1-3].

Полым катодом называется катод, рабочая поверхность которого имеет отрицательную кривизну или состоит из отдельных поверхностей (включая и плоские), ограничивающих часть пространства газоразрядного прибора и создающих полость. В качестве полых катодов часто используются трубки (круглого или прямоугольного сечения), а также две плоские параллельные друг другу пластины любой формы, имеющие электрическое соединение. Главной особенностью разрядов с полым катодом является следующий эффект: при прочих равных условиях ток при заданном напряжении оказывается больше, чем в случае использования плоского катода, и резко возрастает при уменьшении межэлектродного расстояния, когда область отрицательного свечения у противоположных катодов перекрывается и фарадеево темное пространство исчезает – эффект полого катода. Основные причины этого явления связаны с более эффективным использованием ионов и быстрых электронов для поддержания разряда, причем это использование сильно зависит от геометрии разрядного объема.

Главные особенности эффекта полого катода можно суммировать следующим образом [1,2]: Большое увеличение плотности тока наблюдается при уменьшении расстояния между стенками катода (или его радиуса) при постоянном напряжении. При средних давлениях для заданных напряжений и расстояний между стенками катода (или радиуса) разрядный ток слабо уменьшается при понижении давления. При низких давлениях может наблюдаться рост тока. Рабочие напряжения значительно ниже, чем для разряда с плоским катодом. Вольт-амперные характеристики разряда с полым катодом имеют малый положительный наклон. При низких давлениях газа разряд переходит в высоковольтную фазу, характеризующуюся присутствием электронного луча.

Геометрия электрических полей в высоковольтном разряде с полым катодом в этом случае такова, что по оси трубки формируется электронный луч. Граница катодного слоя приобретает воронкообразный профиль, и верхняя плазменной воронки проникает внутрь полости катода. При этом электроны, ускоренные на каком-либо участке катодного падения, входят в этот тонкий конический плазменный стержень с большими скоростями, проходят его насквозь, попадают в противоположный участок катодного падения, тормозятся встречным полем, останавливаются, начинают движение в противоположном направлении, снова попадают в плазму, проходят ее и т.д. Быстрые электроны, стартующие с одной стороны катодного слоя, отражаются в обратном поле с противоположной стороны и возвращаются в область отрицательного свечения. Следовательно, они могут дополнительно размножаться, рождая электроны в слое, которые способны к дальнейшей ионизации. В результате таких осцилляций в полости происходит дополнительная (по сравнению с плоским катодом при том же напряжении) ионизация. Тормозясь во встречном поле, электроны формируют заметный отрицательный объемный заряд, который компенсирует положительный объемный заряд пространства катодного падения и способствует приближению границы плазмы к поверхности катода [1,2]. Кроме этого, уменьшая свою энергию при торможении во встречном поле, электроны более эффективно ионизируют газ и увеличивают плотность плазмы, прижимающейся к катоду. В результате действия этих факторов плазма прорывается внутрь катода, ток резко растет, напряжение на разрядном промежутке падает. Возникает эффект полого катода (“полый режим”), обусловленный осцилляцией внутри полости значительного количества быстрых электронов.

Хорошо известно применение тлеющего разряда с холодным катодом в стабилитронах и тиратронах. Обычные стабилитроны используют вертикальный участок вольт-амперной характеристики нормального тлеющего разряда. При этом приходится делать размеры катода большими, чтобы обеспечить увеличение тока за счет роста площади катода, покрытой свечением. Оптимальным в данном случае является использование полого катода [1].

Тлеющий разряд с полым катодом нашел широкое применение для непрерывной накачки газоразрядных лазеров. В большинстве лазерных устройств используется обычный разряд с цилиндрическим полым катодом, работающий при напряжениях между 200 и 400 В и имеющий практически вертикальную вольт-амперную характеристику. Однако в этих устройствах ток может быть неоднородно распределен по поверхности катода, приводя к появлению неустойчивостей. Эта проблема может быть решена с использованием сегментированного полого катода [4]. В работе [4] с помощью численного метода Монте-Карло определены пространственные распределения скорости ионизации, функция распределения электронов по энергиям, а также распределение тока быстрых электронов по поверхности анода. Получено, что пик рождения заряженных частиц находится в центре разрядной камеры благодаря фокусирующим свойствам геометрии катода. В работах [5-7] исследованы разряды с сегментированным полым катодом, используемые для накачки ультрафиолетовых лазеров на основе ионов меди. Показано, что в данной геометрии полого катода происходит фокусировка быстрых электронов в центральной части разряда даже при сравнительно высоких давлениях газа. Использование сегментированного катода позволяет поддерживать горение разряда при более высоких напряжениях, что приводит к более эффективному возбуждению распыленных с катода металлов. В работе [8] сегментированный полый катод был использован для накачки лазера в видимом диапазоне, использующий переход в однократно ионизованном паре золота (Au II).

Авторы работы [9] показали, что уменьшение диаметра отверстия в полым катодом до 100 мкм позволило расширить рабочий диапазон источника эксимерного излучения вплоть до атмосферного давления. В работе [10] с помощью численного моделирования получены профили заряженных частиц (электронов, ионов аргона и меди), а также распыленных атомов меди в продольном разряде с полым катодом. Получено, что заряженные частицы распределены в полым катодом сильно неоднородно. С помощью аналитической модели в работе [11] получены соотношения между напряжением, током, плотностью плазмы и осевой структурой разряда с продольным полым катодом.

Кроме того, разряд с полым катодом нашел широкое применение для осаждения тонких пленок. Так, в работе [12] тонкие пленки меди (вплоть до 5 мкм) были осаждены на подложки из нержавеющей стали, которые располагались на внутренней поверхности полого катода. Авторы работы [13] разработали комбинированный источник с разрядом на основе полого катода, работающий при атмосферном давлении и позволяющий обработку поверхностей большой площади (например, рулонных материалов), в том числе термочувствительных. Подобный комбинированный источник на основе полого катода применен авторами [14] для осаждения полимерных пленок на металлические и полимерные фольги, мембраны, текстиль, бумагу и т.д. Ионная система с полым катодом использована авторами работы [15] для осаждения пленок TiN.

Одним из важнейших применений систем с полым катодом являются ионные источники с широким пучком [16]. Авторы работы [16] исследовали коаксиальную электродную структуру с цилиндрическим полым катодом и центральным стержневым анодом, на основе которой были получены широкие ионные пучки с площадью сечения до 200 см<sup>2</sup>, плотностью тока пучка до 10 мА/см<sup>2</sup> и энергией до 50 кэВ.

Разряды с полым катодом используются также в источниках электронов. Авторы работы [17] описали генерацию сильного электронного пучка в пульсирующем разряде с полым катодом, в котором использовалось ускоряющее напряжение с амплитудой 20 кВ и длительностью импульсов 500 нс.

В статье [18] разработана двумерная самосогласованная модель тлеющего разряда с полым плоскопараллельным катодом в аргоне. Эта модель содержала гидродинамическое описание положительных ионов и медленных электронов, а также кинетическое моделирование движения быстрых электронов. В эксперименте разряд зажигался между двумя плоскими медными дисковыми катодами, окруженными металлической трубкой-анодом. Экспериментально и теоретически были получены пространственные профили потенциала плазмы, плотности ионов и интенсивности свечения.

Влияние геометрических размеров, материала катода и рода газа на область оптимальных давлений тлеющего разряда с цилиндрическим полым катодом было изучено в работе [19]. Подробно исследовано напряжение горения, радиальное распределение интенсивности свечения и ширина темного катодного пространства разряда с цилиндрическим полым катодом из железа, никеля и молибдена в диапазоне давлений гелия, неона, аргона и воздуха от 10<sup>-2</sup> до 10 Торр. В работе [20] представлены экспериментальные и теоретические результаты изучения функции распределения электронов по энергиям в самостоятельном тлеющем разряде с цилиндрическим полым катодом в азоте и кислороде. Показано, что в таком разряде в азоте на функции распределения электронов при энергии 2-4 эВ появляется значительный зазор (обедненный электронами с данной энергией), что связано с колебательным возбуждением молекул азота. Исследованию характеристик импульсного разряда с цилиндрическим полым катодом посвящена работа [21], в которой определена временная эволюция плотности распыленных атомов магния в фазе послесвечения.

Для того чтобы корректно применять тлеющий разряд, необходимо знать условия его существования и количественные характеристики в различных режимах горения, поэтому этот вопрос уже давно исследуется рядом научных групп. Как видно из приведенного выше краткого обзора, в большинстве работ исследовался тлеющий разряд с цилиндрическим полым катодом, а также с сегментированным катодом. В настоящее время в литературе имеется лишь несколько работ [22-25], посвященных зажиганию разряда с полым катодом. Также необходимо изучить характеристики разряда с полым катодом в широком диапазоне давлений газа. В связи с этим целью данной работы было экспериментально исследовать пробой газа, вольт-амперные характеристики и радиальные профили электронного тока на анод тлеющего разряда постоянного тока в камере с полым катодом.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для изучения зажигания и вольт-амперных характеристик тлеющего разряда постоянного тока с полым катодом использовалась разрядная камера, схема которой показана на рис.1. Кварцевая трубка имела внутренний диаметр 56 мм. Диаметр плоского анода из нержавеющей стали был равен 55 мм. Полый катод имел следующую форму. Две пластины толщиной 2 мм располагались на расстоянии 8 мм друг от друга и крепились к плоскому диску диаметром 55 мм. Концы пластин находились на расстоянии 37 мм от плоской части катода. Весь катод был изготовлен из дюралюминия. Такая форма полого катода удобна для визуальных наблюдений структуры разряда, распределения свечения в полости катода при различных режимах горения.

Эксперименты проводились для двух расстояний между плоскими частями электродов (анода и катода) 100 мм и 395 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  $10^{-3}$  Торр. Генератор постоянного тока подключался к аноду, а катод 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  $p = 0,02 - 10$  Торр в диапазоне постоянного напряжения  $U_{dc} \leq 4000$  В.

Перед началом измерений проводилась очистка поверхности полого катода ионной бомбардировкой. Для этого зажигался разряд в высоковольтном режиме, давление азота было 0,1 Торр, разрядный ток - примерно 20 мА, время очистки - 10 минут. Такая очистка катода нужна для удаления с его поверхности оксидной пленки, микропробой которой вызывают пульсации разрядных характеристик. После очистки полого катода появляется повторяемость результатов экспериментов, выполненных при одних и тех же условиях в разные дни.

Для измерения радиального распределения электронного тока на анод был создан электрод (диаметром 55 мм) с 9 коллекторами тока, расположенными вдоль прямой линии по диаметру этого электрода (рис.2). Диаметр каждого коллектора был равен 1 мм. Коллекторы электрически были изолированы от электрода, при этом собирающие поверхности коллекторов и поверхность электрода находились в одной плоскости. Ток, собираемый коллекторами, проходил через резисторы сопротивлением 1 кОм, а падение напряжения на каждом резисторе подавалось на ПК. Токи на все коллекторы измерялись одновременно, при этом измерения проводились 20 раз, а затем полученные

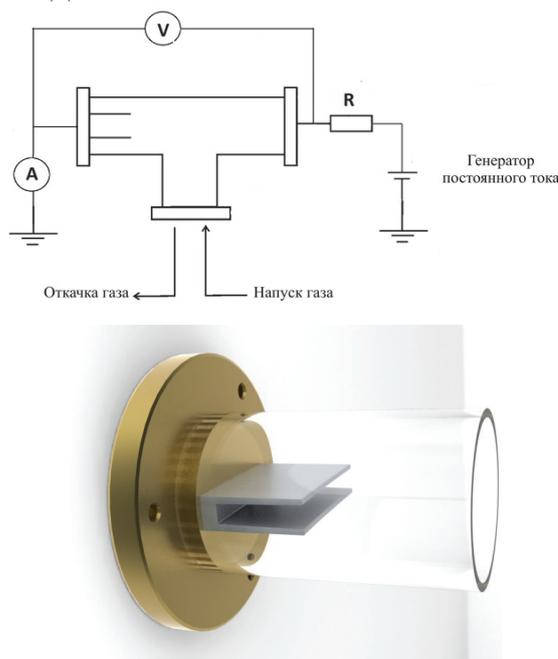


Рис. 1. Схема и внешний вид экспериментальной установки с полым катодом.

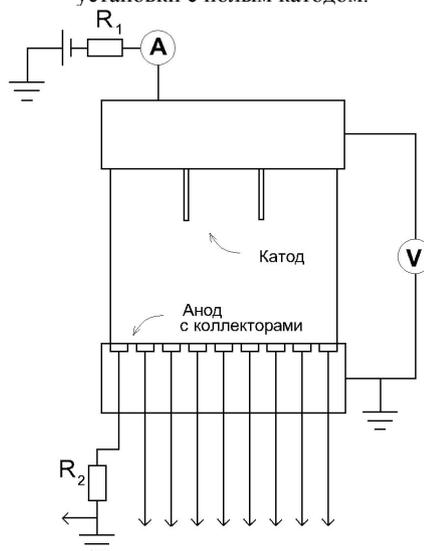


Рис. 2. Схема разрядной камеры, содержащей анод с коллекторами.

результаты усреднялись. Генератор постоянного тока подключался к катоду, а анод был заземлен.

### ЗАЖИГАНИЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОЛЫМ КАТОДОМ

Для зажигания тлеющего разряда необходимо, чтобы скорость рождения заряженных частиц вследствие ионизации молекул газа электронным ударом и вторичной ион-электронной 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. 3 приведены кривые зажигания тлеющего разряда в азоте в камере, показанной на рис. 1, с полым катодом и с двумя зазорами между плоскими электродами ( $L = 100$  мм и  $L = 65$  мм). В камере с полым катодом расстоянию  $L = 100$  мм соответствует зазор между плоскими частями электродов, а  $L = 65$  мм – зазор между анодом и краями пластин, составляющими полый катод.

Из рисунка видно, что при низких давлениях газа совпадают левые ветви кривых зажигания для полого катода и для зазора между плоскими электродами  $L = 100$  мм. По-видимому, при низких давлениях газа пробой в камере с полым катодом происходит между плоскими частями электродов, то есть вдоль наибольшего пути. При низких давлениях газа первый коэффициент Таунсенда для рождения ион-электронных пар ударами быстрых электронов невелик, поэтому оптимальной для развития электронной лавины является область между плоскими поверхностями электродов (вдоль самых длинных силовых линий электрического поля). Поэтому мы и видим совпадение левых ветвей кривых зажигания для полого катода и для плоских электродов, зазор между которыми равен расстоянию между плоскими поверхностями полого катода и анода. При более высоких давлениях газа правая ветвь кривой зажигания разряда с полым катодом близка к кривой зажигания для зазора между плоскими электродами  $L = 65$  мм. В этом случае разряд зажигается между анодом и краями пластин, составляющих полый катод. При этом кривая зажигания для полого катода проходит немного ниже кривой для плоского зазора, так как вблизи краев пластин полого катода распределение электрического поля сильно неоднородно.

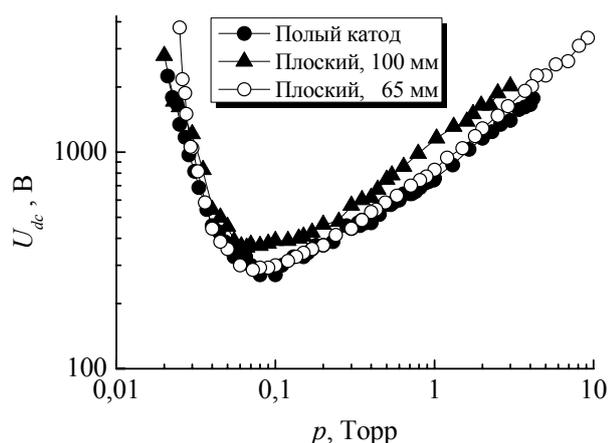


Рис.3. Кривые зажигания разряда постоянного тока с полым катодом ( $L = 100$  мм), с плоским катодом ( $L = 100$  мм), с плоским катодом ( $L = 65$  мм).

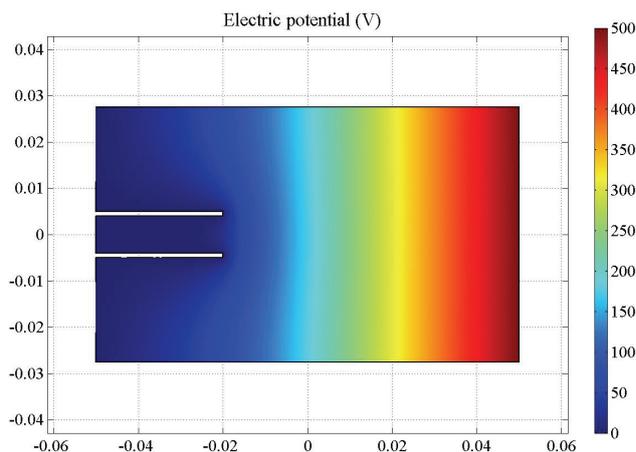


Рис.4. Распределение потенциала в камере с полым катодом при отсутствии разряда. Катод расположен слева.

На рис.4 представлено распределение потенциала электрического поля в камере с полым катодом при отсутствии разряда. В этом случае распределение поля является вакуумным, то есть не возмущенным заряженными частицами в зазоре между электродами. Данное распределение потенциала было получено с помощью программы Femlab, которая позволяет численно решать дифференциальные уравнения с частными производными для многих прикладных задач. На картине распределения потенциала мы видим почти вертикальные эквипотенциальные линии вдали от полого катода (вблизи анода). Вблизи самого полого катода эти линии сильно искривлены, огибая полый катод. Данное распределение потенциала было получено для напряжения на электродах 500 В. Из рисунка видно, что основное падение напряжения наблюдается в пространстве между краями пластин полого катода и анодом, до этой границы падение напряжения не превышает 100 В.

Анализ полученных в данной работе результатов показывает, что целесообразно повторить измерения кривых зажигания для камеры с полым катодом, которая использовалась в работе Гусевой [22]. В ее экспериментах полый катод имел форму цилиндрического стакана, в который наподобие поршня с небольшим зазором входил анод. Положение анода внутри полости могло меняться, так что расстояние между дном катодного стакана и плоской рабочей поверхностью анода могло быть сделано различным. В работе [22] получено, что чем больше отношение длины полого катода к его диаметру (чем больше неоднородность распределения электрического поля в полости), тем большее напряжение необходимо, чтобы зажечь разряд.

Левые ветви кривых зажигания для полого катода прошли в диапазоне более высоких давлений газа и приложенных напряжений, чем для плоских электродов. Однако из рис. 3 следует, что левые ветви кривых зажигания для полого катода в экспериментах Гусевой [22] должны были совпасть с соответствующими левыми ветвями кривых зажигания тлеющего разряда с плоскими электродами. Зажигание разряда в условиях левых ветвей соответствует развитию электронных лавин вдоль наиболее длинных силовых линий электрического поля, длина которых была близка к длине силовых линий для случая плоских электродов.

### ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ РАЗРЯДА С ПОЛЫМ КАТОДОМ

Эксперименты были проведены с разрядной трубкой диаметром 55 мм и двумя различными расстояниями между электродами: 100 мм и 395 мм. Сначала рассмотрим результаты для случая зазора между электродами 100 мм. Сравним при этом вольт-амперные характеристики для разрядов с полым катодом (рис.5) и с плоскими электродами (рис.6).

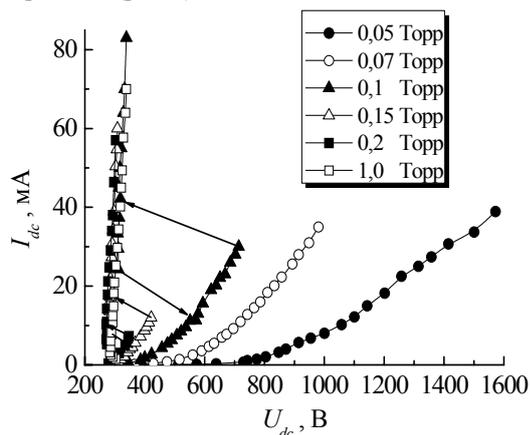


Рис.5. Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда с полым катодом при различных давлениях азота и расстоянии между плоскими частями электродов 100 мм.

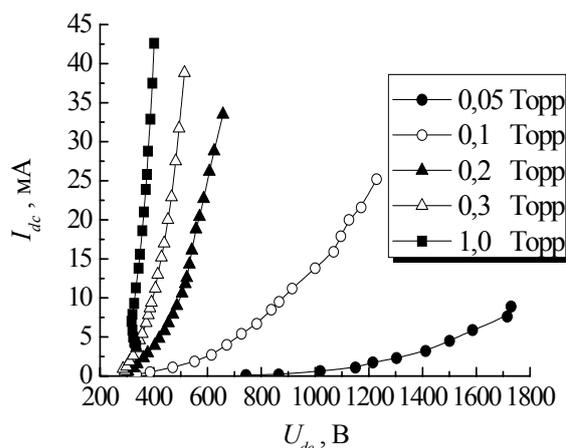


Рис.6. Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда с плоским катодом при различных давлениях азота и расстоянии между электродами 100 мм.

Из этих рисунков видно, что при низких давлениях (см., например, кривые для 0,05 Торр) разрядный ток растет с напряжением на электродах гораздо быстрее в случае полого катода, чем для плоских электродов. При таком низком давлении разряд с полым катодом горит в режиме электронного пучка (в высоковольтной форме, которую еще называют электронно-лучевой [1]), что, по-видимому, и приводит к более интенсивной ионизации молекул газа быстрыми электронами. В этом режиме вторичные электроны, вышедшие из поверхности катода, ускоряются вдоль силовых линий электрического поля и формируют электронный пучок. Этот режим имеет растущую вольт-амперную характеристику, то есть повышение разрядного тока сопровождается ростом напряжения на электродах. Граница катодного слоя огибает полый катод на значительном расстоянии и не может проникнуть в полость между пластинами полого катода. Из фотографии на рис. 7 видно синее свечение, простирающееся от катодной полости до самого анода, и указывающее на наличие электронов высокой энергии в этой области разряда.

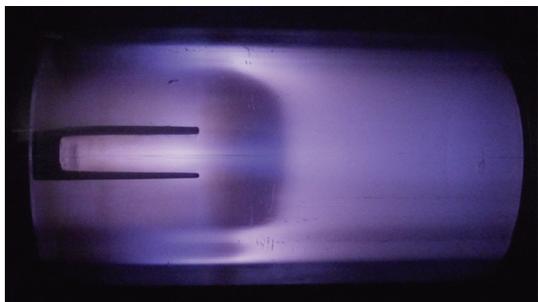


Рис.7. Фотография разряда при давлении азота  $p = 0,05$  Торр, режим электронного пучка, расстояние между электродами 100 мм, разрядный ток 10 мА.

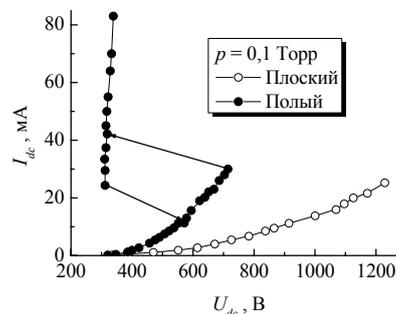


Рис.8. Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда с плоским и полым катодами при давлении азота 0,1 Торр и расстоянии между электродами 100 мм.

Вольт - амперные характеристики для разряда с полым и плоским катодами при давлении азота 0,1 Торр сравниваются на рис. 8. Из рисунка следует, что в тлеющем режиме разряда с полым катодом ток возрастает с повышением напряжения гораздо быстрее, чем для плоских электродов. При этом давлении газа наблюдается резкий гистерезисный переход в полый режим с одновременным понижением напряжения на электродах и повышением разрядного тока. На рис. 9 представлены фотографии разрядов в тлеющем и полном режимах. Для них характерно отсутствие положительного столба со стратами, а также анодного свечения.

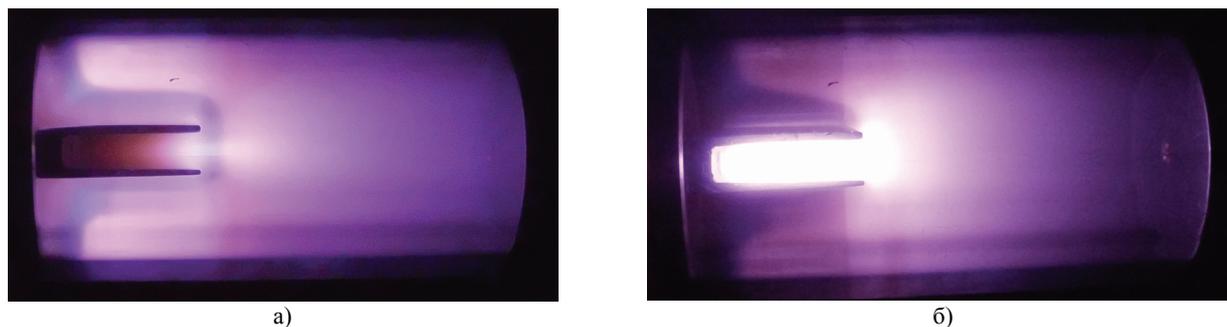


Рис.9. Фотография разряда при давлении азота  $p = 0.15$  Торр, расстояние между электродами 100 мм.  
а) тлеющий режим, разрядный ток 10 мА. б) режим с полым катодом, разрядный ток 10 мА.

Из сравнения вольт-амперных характеристик для плоского и полого катодов при давлении азота 1 Торр видно (рис. 10), что наличие полого катода позволяет поддерживать горение разряда при заметно более низком напряжении, чем для плоских электродов. При этом разрядный ток возрастает с напряжением гораздо быстрее в случае полого катода, чем плоских электродов. Вблизи анода наблюдаются как анодное свечение, так и однородный положительный столб.

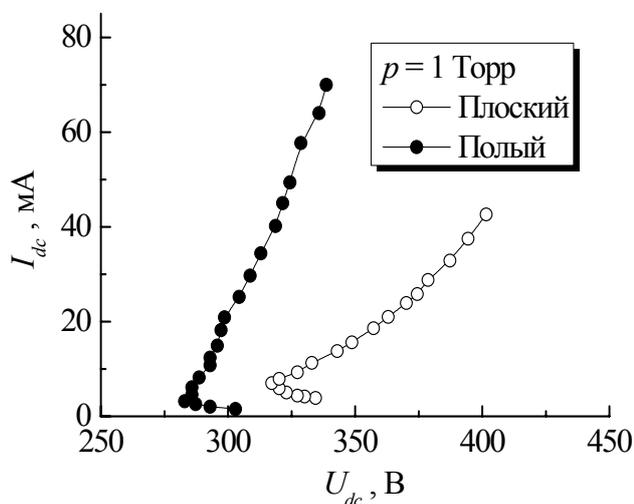


Рис.10. Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда с плоским и полым катодами при давлении азота 1 Торр и расстоянии между электродами 100 мм.

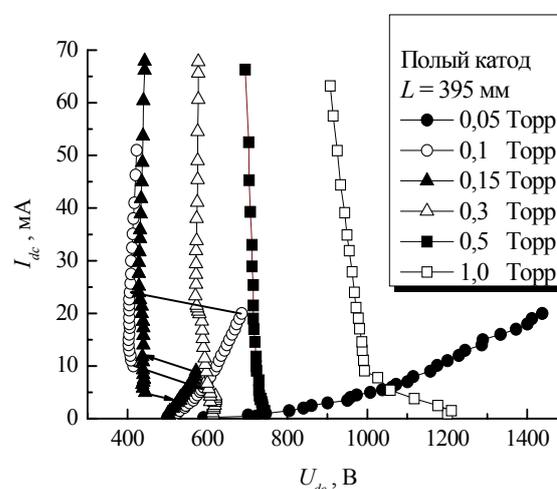


Рис.11. Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда с полым катодом при различных давлениях азота и расстоянии между плоскими частями электродов 395 мм.

Теперь рассмотрим результаты для расстояния между электродами 395 мм. На рис. 11 показаны вольт-амперные характеристики тлеющего разряда с полым катодом при разных давлениях в разрядной камере. При самых низких давлениях газа (на рисунке это соответствует случаю 0,05 Торр) разряд горит в высоковольтной форме. При этом граница катодного слоя не проникает в зазор между пластинами, составляющими полый катод, а огибает его на некотором удалении. В зазоре между пластинами полого катода видно довольно яркое свечение, что указывает на наличие электронов высокой энергии в этом зазоре. Электроны пучка, вылетающего из катодного слоя, формируют протяженное отрицательное свечение в трубке. Положительный столб в этом режиме не наблюдается, только на аноде имеются анодные пятна.

При более высоких давлениях газа ( $p \geq 0,1$  Торр) разряд сначала горит в тлеющем режиме, фотография которого показана на рис. 12а. Этот режим визуально отличается от высоковольтного тем, что в полости между пластинами катода разрядное свечение практически отсутствует. Однако и в этом же случае вольт-амперная характеристика разряда является растущей. Граница катодного слоя прогибается по направлению к полости между пластинами полого катода, но пока не проникает в этот зазор. В то же время граница катодного слоя проникает в область между пластинами катода и стенкой разрядной трубки. При более высоких значениях тока разряд переходит в режим полого катода, что сопровождается резким увеличением разрядного тока с одновременным понижением напряжения на электродах. Этот переход происходит скачкообразно, при этом разряд заполняет пространство между пластинами полого катода (рис. 12б) и состоит из двух катодных слоев, с общим отрицательным свечением между ними. В этом режиме вольт-амперная характеристика представляет собой практически вертикальную прямую, разряд горит в нормальном режиме, заполняя только часть поверхности полого катода. При понижении тока в полом режиме свечение между пластинами катода ослабевает и затем разряд скачком возвращается в тлеющий режим, а на вольт-амперной характеристике наблюдается гистерезис.

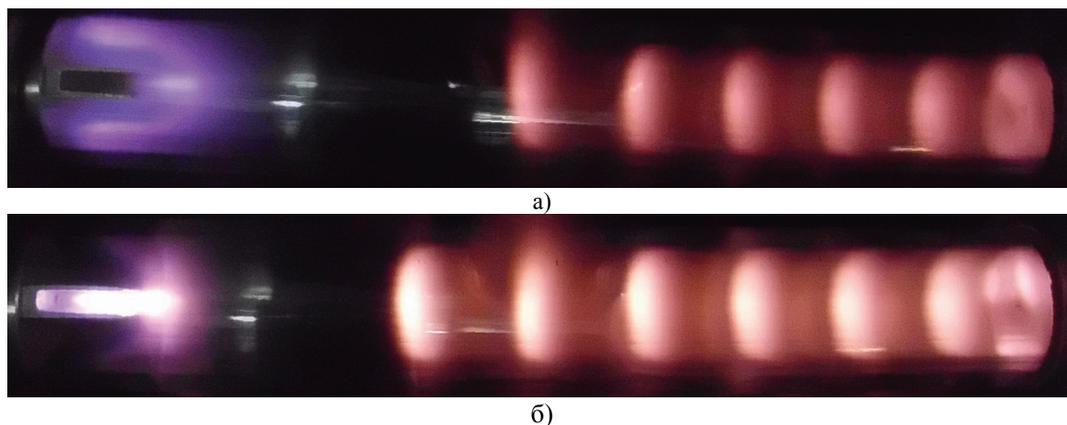


Рис. 12. Фотографии тлеющего разряда с полым катодом, давление азота 0,2 Торр.

а) тлеющий режим, разрядный ток 5 мА; б) полый режим, разрядный ток 10 мА. Катод расположен слева.

В рассматриваемой в данном случае длинной трубке наблюдается также стратифицированный положительный столб, состоящий из чередующихся темных и светлых слоев. Это слоистое состояние является более выгодным для положительного столба при низких давлениях газа (в условиях больших потерь заряженных частиц на стенках трубки вследствие амбиполярного диффузионного ухода), так как напряжение распределено в положительном столбе вдоль оси разряда в виде ступенек, и электроны более эффективно набирают энергию и ионизуют молекулы газа. В области отрицательного свечения в тлеющем режиме находится максимум плотности плазмы [3]. В самом отрицательном свечении и в темном фарадеевом пространстве ток переносится за счет диффузионного потока из области максимальной плотности плазмы в сторону анода. Когда этот диффузионный поток становится недостаточным для переноса тока, а плотность плазмы падает до некоторой критической величины, формируется положительный столб.

При переходе разряда в полый режим отрицательное свечение становится почти полностью сосредоточенным в полости между пластинами катода. Это приводит к тому, что граница положительного столба смещается ближе к катоду. В этом случае разряд горит в нормальном режиме, заполняя с ростом тока не только поверхности катода в зазоре между пластинами, но и распространяясь затем на внешнюю поверхность пластин, а также на плоскую поверхность катода.

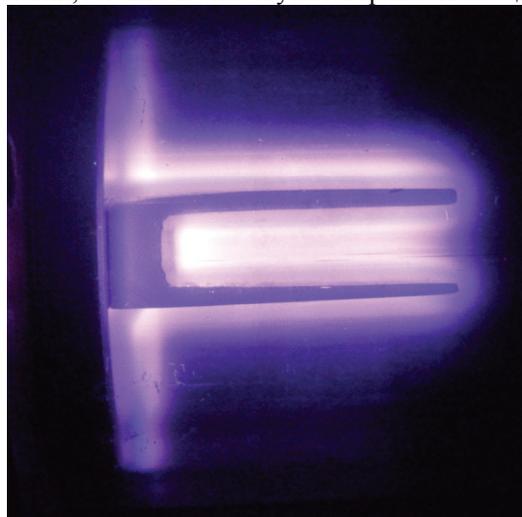


Рис. 13. Фотографии разряда в катод в полый режиме, давление азота 1 Торр, разрядный ток 30 мА.

При давлениях азота выше 0,3 Торр переход из тлеющего в полый режим перестает быть скачкообразным и происходит непрерывно, а гистерезис исчезает. С повышением давления газа положительный столб становится более однородным.

Падение напряжения на положительном столбе сильно зависит от разрядного тока, давления газа и геометрии разрядной трубки. Поэтому расширение разрядного пятна нормального режима по поверхности катода и изменение длины положительного столба может сопровождаться как увеличением, так и уменьшением напряжения на электродах с ростом тока.

При давлении азота 1 Торр вольт-амперная характеристика в нормальном режиме является отрицательной во всем исследованном диапазоне разрядных токов. На фотографии, представленной на рис. 13, видно, что в полости между пластинами катода наблюдаются два катодных слоя, а также два отрицательных свечения, перекрывающихся в центре зазора между плоскостями полого катода. В этот же зазор

начинает проникать темное фарадеево пространство. В этом случае эффект полого катода полностью отсутствует, так как толщина катодного слоя становится малой по сравнению с зазором между пластинами катода.

### РАДИАЛЬНАЯ СТРУКТУРА РАЗРЯДА С ПОЛЫМ КАТОДОМ

Целью настоящего эксперимента было исследование радиального распределения плотности тока электронов, приходящих на поверхность анода в различных режимах горения разряда. Принципиальная схема разрядной камеры, которая использовалась в данном случае, представлена на рис. 2. Сначала рассмотрим радиальные профили для разряда с электронным пучком, который наблюдается при низких давлениях газа.

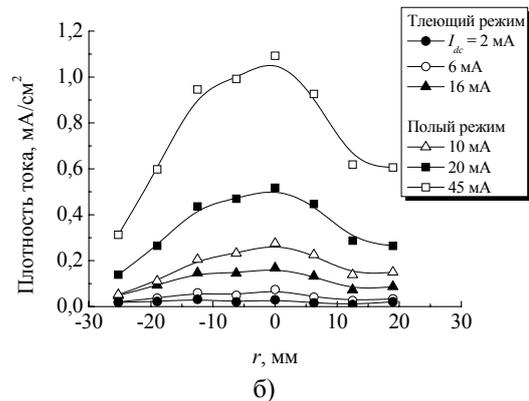
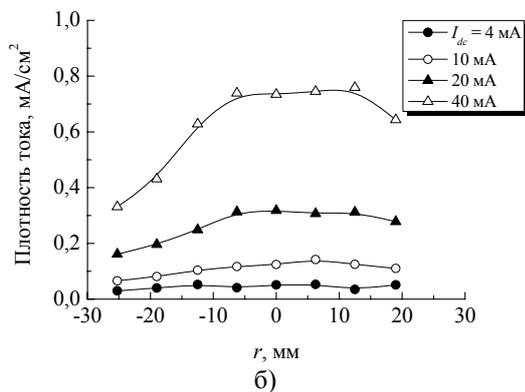
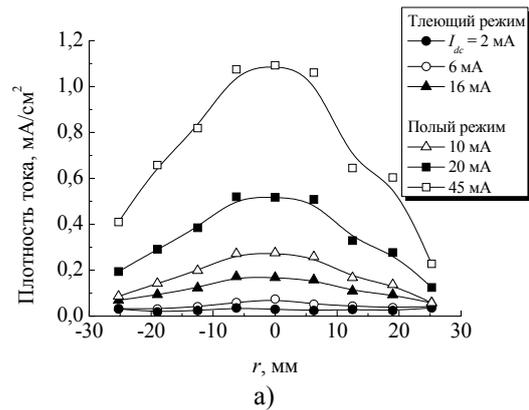
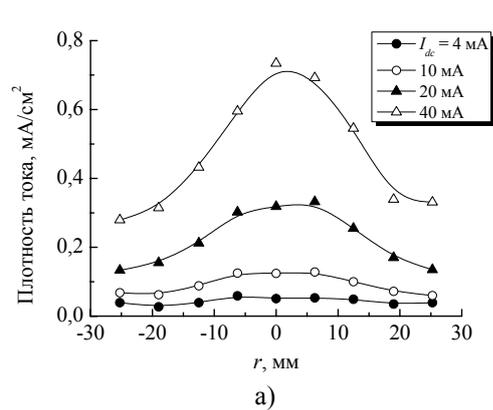


Рис. 14. Профили электронного тока на анод при  $p = 0,05$  Торр при различных разрядных токах в режиме электронного пучка:

Рис. 15. Профили электронного тока на анод при  $p = 0,15$  Торр при различных разрядных токах в тлеющем и полном режимах: а) коллекторы расположены поперек полого катода; б) коллекторы расположены вдоль полого катода.

а) коллекторы расположены поперек полого катода;  
б) коллекторы расположены вдоль полого катода.

На рис. 14 показаны радиальные распределения плотности электронного тока на анод в двух различных перпендикулярных направлениях. В первом случае коллекторы на аноде располагались поперек зазора между пластинами полого катода. Во втором случае цепочка коллекторов на аноде была направлена вдоль полости катода. В первом случае радиальный профиль электронного тока имеет резко выраженный максимум в области оси разрядной камеры и быстро падает в направлении стенок трубки. Во втором случае профиль является более плоским. В данном эксперименте не проводился анализ приходящих на анод электронов по энергиям. На анод приходят как электроны пучка, вышедшего из полого катода, так и медленные электроны, рожденные в плазме, в том числе и этим же электронным пучком. Из рис. 14 видно, насколько однородным является пучок электронов, выходящих из зазора полого катода, а также насколько этот пучок расходится при своем движении к аноду.

При более высоких давлениях газа происходит сильное рассеяние электронов пучка. При давлении азота порядка 0,05 Торр (рис. 14) электронный пучок является хорошо сфокусированным и явно достигает поверхности анода, слабо рассеиваясь по пути. Повышение давления газа в 3 раза приводит к сильному рассеянию электронов пучка, при этом часть электронов уходит на стенки трубки, не достигая поверхности анода. Как видно из рис. 15, радиальные профили электронного тока на анод становятся примерно одинаковыми в обоих поперечных направлениях. Переход разряда в полный режим не изменяет существенно эти радиальные профили.

## ВЫВОДЫ

В данной работе были измерены кривые зажигания тлеющего разряда постоянного тока с полым и плоским катодами при зазоре между электродами  $L = 100$  мм. Показано, что при низких давлениях газа совпадают левые ветви кривых зажигания для полого катода и для зазора между плоскими электродами  $L = 100$  мм. По-видимому, при низких давлениях газа пробой в камере с полым катодом происходит между плоскими частями электродов, то есть вдоль наибольшего пути, и оптимальной для развития электронной лавины является область между плоскими поверхностями электродов. При более высоких давлениях газа правая ветвь кривой зажигания разряда с полым катодом близка к кривой зажигания для зазора между плоскими электродами  $L = 65$  мм, то есть между краем пластин полого катода и плоским анодом. При этом кривая зажигания для полого катода проходит немного ниже кривой для плоского зазора, так как вблизи краев

пластин полого катода распределение электрического поля сильно неоднородно.

Измерены вольт-амперные характеристики разряда с полым катодом для двух различных расстояний между электродами 395 мм и 100 мм. Показано, что при низких давлениях газа разряд горит в высоковольтной (электронно-лучевой) форме с растущей вольт-амперной характеристикой, когда вторичные электроны ускоряются вдоль силовых линий электрического поля и формируют электронный пучок.

При давлениях газа  $p \geq 0,1$  Торр разряд сначала горит в тлеющем режиме, в котором в полости между пластинами катода разрядное свечение практически отсутствует, а вольт-амперная характеристика разряда является растущей. Граница катодного слоя прогибается по направлению к полости между пластинами полого катода, но пока не проникает в этот зазор. При более высоких значениях тока разряд переходит в режим полого катода, заполняя пространство между пластинами, и имеет практически вертикальную вольт-амперную характеристику. Этот переход происходит скачкообразно, при этом разряд полого катода и состоит из двух катодных слоев, с общим отрицательным свечением между ними. Переход разряда из тлеющего режима в полый и обратно имеет гистерезисный характер.

При давлениях газа  $p \sim 1$  Торр эффект полого катода полностью исчезает, так как толщина катодного слоя становится малой по сравнению с зазором между пластинами катода. В полости между пластинами катода наблюдаются два катодных слоя, а также два отрицательных свечения, перекрывающихся в центре зазора между плоскостями полого катода.

Исследовано также радиальное распределение плотности тока электронов, приходящих на поверхность анода в различных режимах горения разряда. Показано, что когда коллекторы на аноде располагаются поперек зазора между пластинами полого катода, радиальный профиль электронного тока имеет резко выраженный максимум в области оси разрядной камеры и быстро спадает в направлении стенок трубки. Профиль является более плоским, если цепочка коллекторов на аноде направлена вдоль полости катода. При более высоких давлениях газа происходит сильное рассеяние электронов пучка. При давлении азота порядка 0,05 Торр электронный пучок является хорошо сфокусированным, слабо рассеиваясь по пути. Повышение давления газа приводит к сильному рассеянию электронов пучка, при этом часть электронов уходит на стенки трубки, не достигая поверхности анода, а радиальные профили электронного тока на анод становятся примерно одинаковыми в обоих поперечных направлениях как в тлеющем, так и в полом режимах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moskalev B.I. Razryad s polym katodom. – М.: Energiya, 1969. – 184 s.
2. Entsiklopediya nizkotemperaturnoy plazmy. Vvodnyy tom 2, pod red. Fortova V.E. – М.: Nauka, 2000 – 634 s.
3. Rayzer Yu.P. Fizika gazovogo razryada. – М.: Nauka, 1987. – 592 с.
4. Donko Z., Rozsa K., Tobin R.C. Monte Carlo analysis of the electrons motion in a segmented hollow cathode discharge // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1996. – Vol.29, №1. – P.105-114.
5. Donko Z., Apai P., Szalai L., Rozsa K., Tobin R.C. The segmented hollow cathode discharge: A pumping source for UV metal ion lasers // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1996. – Vol.24, №1. – P.33-34.
6. Donko Z., Szalai L., Rozsa K. High-gain ultraviolet Cu-II lasers in a segmented hollow cathode discharge // IEEE J. Quantum Electronics. – 1998. – Vol.34, №1. – P. 47-53.
7. Donko Z., Rozsa K., Szalai L. High-voltage hollow cathode discharges: Laser applications and simulations of electron motion // Plasma Physics Reports. – 1998. – Vol.24, №7. – P.588-598.
8. Bano G., Szalai L., Kutasi K., Hartmann P., Donko Z., Rozsa K., Kiss A., Adamowicz T.M. Operation characteristics of the Au-II 690-nm laser transition in a segmented hollow-cathode discharge // Appl. Phys. B. – 2000. – Vol.70. – P. 521-525.
9. El-Habachi A., Schoenbach K.H., Generation of intense excimer radiation from high-pressure hollow cathode discharges // Appl. Phys. Lett. - 1998. – Vol.73, №7. – P. 885-887.
10. Mihailova D., Grozeva M., Hagelaar G.J.M., van Dijk J., Brok W.J.M., van der Mullen J.J.A.M. A flexible platform for simulations of sputtering hollow cathode discharges for laser applications // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2008. – Vol.41, №24. – P. 245202 (10pp).
11. Hagelaar G.J.M., Mihailova D.B., van Dijk J. Analytical model of a longitudinal hollow cathode discharge // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2010. – Vol.43. – P. 465204 (11pp).
12. Baggio-Scheid V.H., Neri J.W., de Vasconcelos G. Atomic emission spectroscopy of a hollow cathode discharge used for deposition applications // Surface and Coatings Technology. – 2001. – Vol.146-147. – P.469-473.
13. Barankova H., Bardos L. Hollow cathode plasma sources for large area surface treatment // Surface and Coatings Technology. – 2001. – Vol.146-147. – P. 486-490.
14. Kozec D., Engemann J., Mildner M., Theirich N.B. Multi-jet hollow cathode discharge for remote polymer deposition // Surface and Coatings Technology. – 1997. – Vol.93. – P. 128-133.
15. Chen Y.M., Yu G.P., Huang J.H. Role of process parameters in the texture evolution of TiN films deposited by hollow cathode discharge ion plating // Surface and Coatings Technology. – 2001. – Vol.141. – P.156-163.
16. Gavrilov N.V., Mesyats G.A., Radkovski G.V., Bersenev V.V. Development of technological sources of gas ions on the basis of hollow-cathode glow discharges // Surface and Coatings Technology. – 1997. – Vol.96. – P.81-88.
17. Gleizer J. Z., Krokmal A., Krasik Ya. E., Felsteiner J. High-current electron beam generation by a pulsed hollow cathode // J. Appl. Phys. – 2002. – Vol. 91, №5. – P.3431-3443.
18. Kutasi K., Donko Z. Hybrid model of a plane-parallel hollow-cathode discharge // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2000. – Vol.33, №9. – P.1081-1089.
19. Kirichenko V.I., Tkachenko V.M., Tyutyunnik V.B. Vliyanie geometricheskikh razmerov, materiala katoda i roda gaza na

- oblast' optimal'nykh davleniy tleyushchego razryada s tsilindricheskim polym katodom // ZhTF. – 1976. – T.46, №9. – С. 1857-1867.
20. Bazhenov V.Yu., Ryabtsev A.V., Soloshenko I.A., Terentyeva A.G., Tsiolko V.V., Shchedrin A.I. Investigation of the electron distribution function in the glow discharge with hollow cathode // Proc. 15<sup>th</sup> Intern. Symp. on Plasma Chemistry, 2001, Orleans, France. - Vol.3. - P.879-884.
  21. Rusinov I.M., Blagoev A.B. Influence of hydrogen on the sputtered atoms' transport in a cylindrical hollow cathode // Vacuum. – 2000. – Vol.58. – P.256–262.
  22. Guseva L.G. Discharge striking in non-uniform fields at low gas pressures. In “Investigations into electrical discharges in gases”, Ed. by Klyarfeld B.N. – Oxford: Pergamon press, 1964. – C.12-35.
  23. Eichhorn H., Schoenbach K.H., Tessnow T. Paschen's law for a hollow cathode discharge // Appl. Phys. Lett. – 1993. – Vol.63, №18. – P.2481-2483.
  24. Popovici C., Somesan M. Electrostatic field distribution and breakdown potential for a hollow-electrode system in rare gases // International Journal of Electronics. – 1965. – Vol.18, №3. – P.255-267.
  25. Pak H., Kushner M.J. Breakdown characteristics in nonplanar geometries and hollow cathode pseudospark switches // J. Appl. Phys. – 1992. – Vol.71, №1. – P.94-100.