

04;12

## Несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом для широкоапертурных ионных источников

© А.В. Визирь, Е.М. Окс, П.М. Щанин, Г.Ю. Юшков

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 14 февраля 1996 г.)

Предложена разрядная система, в которой для инжекции электронов в катодную полость тлеющего разряда с полым катодом используется вспомогательный газовый разряд. Проведены исследования области устойчивого существования несамостоятельного разряда с полым катодом. Показано, что инжекция электронов позволяет понизить минимальное давление, при котором существует разряд до значений  $< 10^{-2}$  Па. Экспериментально показана возможность применения плазмы исследуемого разряда для генерации широкоапертурных ионных пучков.

### Введение

Стабильные параметры, высокая плотность тока, простота технической реализации делают тлеющий разряд привлекательным для его применения в плазменных источниках заряженных частиц [1,2]. Известно [3], что для функционирования тлеющего разряда в сильноточном низковольтном режиме горения необходимо обеспечить давление в разрядном промежутке порядка 1 Па. Для сохранения же электрической прочности ускоряющего промежутка и транспортировки ускоренного пучка на значительные расстояния давление в этих областях должно быть ниже  $10^{-2}$  Па [4]. В источниках узкофокусированных [5] или трубчатых пучков [6] на основе тлеющего разряда эта проблема решается благодаря созданию перепада давлений на узком эмиссионном канале, разделяющем области ускорения заряженных частиц и генерации плазмы.

Для получения широкоапертурных ионных пучков в системах с плазменным эмиттером из-за значительных размеров площади эмиссионной поверхности давление остаточного газа в разрядном и ускоряющем промежутках практически одинаково [7]. Снижение давления в разрядном промежутке приводит к быстрому росту напряжения горения разряда, и он переходит в высоковольтную слаботочную форму либо обрывается при недостаточном напряжении источника питания.

Создание условий для осцилляции электронов позволяет понизить давление, как это происходит в разрядах пеннинговского [5] или магнетронного [8] типов, а также в разряде с полым катодом [2]. Однако в первом случае наличие в разрядном промежутке магнитного поля существенно ухудшает однородность параметров плазмы, а во втором, хотя минимальное давление, при котором существует низковольтная форма разряда, несколько ниже, чем в обычном тлеющем разряде, оно превышает  $10^{-1}$  Па [9].

Вместе с тем очевидно, что в низковольтной форме тлеющего разряда при малом значении отношения электронного компонента тока с катода к ионному компо-

ненту этого тока внешняя инжекция небольшой доли электронов могла бы обеспечить устойчивое горение тлеющего разряда при более низких давлениях. Для этой цели может быть использован термоэмиссионный катод, однако высокая температура эмиттера и его быстрое отравление в активных газовых средах ограничивает область его применения.

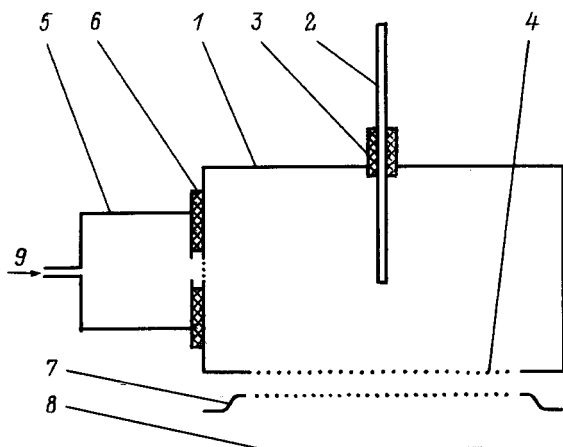
В настоящей работе приведены результаты исследований условий устойчивого горения тлеющего разряда с полым катодом в области низких давлений, в котором для дополнительной инжекции частиц использован плазменный эмиттер электронов с ненакаливаемым катодом.

### Описание экспериментальной установки

Используемая в экспериментах разрядная система, схема которой представлена на рис. 1, состоит из двух основных узлов: разрядного промежутка основного разряда и плазменного эмиттера электронов.

Основной разряд зажигался между цилиндрическим полым катодом 1 (длиной 40 см, диаметром 22 см) и размещенным внутри анодом 2, представляющим собой металлический стержень  $d = 8$  мм. Анод мог вертикально перемещаться в изоляторе 3, что обеспечивало изменение рабочей длины анода, а следовательно, и варьирование площади его рабочей поверхности  $S_a$  в пределах от 3 до 45 см<sup>2</sup>. Отбор ионов из плазмы основного разряда осуществлялся через эмиссионное окно 4 прямоугольного сечения шириной 2.5 см и длиной 30 см, перекрытое для стабилизации эмиссионной поверхности плазмы мелкоструктурной сеткой из нержавеющей стали с размером ячейки 1 мм, расположенное на боковой поверхности полого катода 1.

Дополнительная инжекция электронов в катодную полость основного разряда осуществлялась при их отборе из плазмы вспомогательного разряда, зажигаемого между полым катодом 5 (длиной и диаметром 12.5 см) и электродом 1, являющимся анодом вспомогательного разряда. Вспомогательный разряд инициировался разрядом по поверхности керамического кольца 6, воз-



**Рис. 1.** Схема разрядной системы: 1 — полый катод основного разряда; 2 — анод основного разряда; 3, 6 — керамические изоляторы; 4 — эмиссионное окно; 5 — полый катод вспомогательного разряда; 7 — ускоряющий электрод; 8 — коллектор; 9 — подача газа.

никающим в начальный момент приложения напряжения между электродами вспомогательного разряда. На торце полого катода 5 имелось центральное отверстие диаметром 5 мм, которое было расположено соосно с отверстием диаметром 7 мм в электроде 1. Такие размеры отверстий в электродах 1 и 5 позволили, с одной стороны, поддерживать перепад давлений, необходимый для стабильного зажигания и горения вспомогательного разряда, с другой стороны, обеспечить эффективную эмиссию электронов из плазмы вспомогательного разряда и прохождение электронного потока в катодную полость основного разряда с минимальными потерями (ток инжектируемых электронов составлял 0,8–0,9 от тока вспомогательного разряда). При этом электроны, эмиттированные плазмой вспомогательного разряда, ускорялись в катодном падении основного разряда и, следовательно, имели энергию, равную энергии электронов, эмиттированных со стенок полого катода основного разряда в результате  $\gamma$ -процессов. Для ослабления провисания потенциала в катодную полость вспомогательного разряда отверстие в торцевом электроде закрывалось вольфрамовой сеткой с размером ячейки 0,2 мм. Имелась возможность одновременной инжекции электронов с обоих торцов катодной полости основного разряда при размещении на них двух одинаковых ячеек вспомогательного разряда.

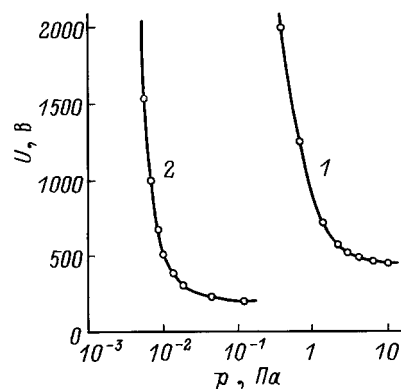
Электрическое питание основного разряда осуществлялось от изолированного на величину ускоряющего напряжения выпрямителя напряжением 2 кВ, обеспечивающего непрерывный ток разряда до 1 А. Ток основного разряда измерялся в цепи катода. Вспомогательный разряд с током до 0,3 А питался от выпрямителя напряжением 3 кВ. Ускоряющее ионы напряжение, величиной до 5 кВ, прикладывалось между катодом 1 и ускоряющим электродом 7, находящимся под отрица-

тельным относительно коллектора 8 потенциалом. Отрицательный потенциал необходим для предотвращения попадания в ускоряющий промежуток  $\gamma$ -электронов с коллектора, образованных ускоренным ионным пучком. Измерение распределения плотности ионного тока пучка осуществлялось цилиндром Фарадея, перемещающимся над коллектором.

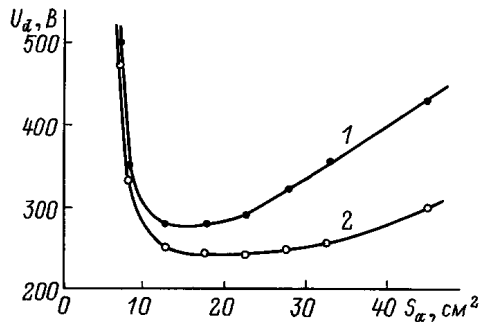
Давление в разрядной системе регулировалось изменением расхода рабочего газа, напускаемого в полый катод вспомогательного разряда. При этом давление газа в катодной области основного разряда и в ускоряющем промежутке варьировалось в пределах  $5 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^{-3}$  Па. Из-за перепада давления при протекании газа через отверстия в электродах 1 и 5 давление в катодной области вспомогательного разряда составляло более 1 Па. В качестве рабочего газа использовались  $N_2$ , He, Ar,  $O_2$ .

## Результаты экспериментов

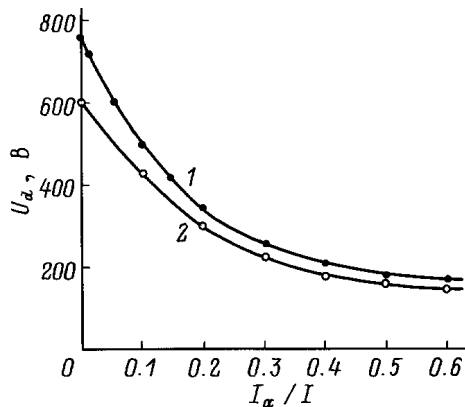
Без инжекции в катод 1 электронов, эмиттированных плазмой вспомогательного разряда, зависимость напряжения зажигания основного разряда от давления (кривая 1 на рис. 2) совпадает с левой ветвью кривой Пашена [10]. Резкое снижение напряжения зажигания разряда достигается при давлении газа 2 Па, что соответствует определяемому из зависимости Пашена межэлектродному расстоянию 20 см, близкому к реализованному в эксперименте. Как видно из рис. 2, напряжение зажигания резко возрастает при понижении давления и без инжекции электронов разряд не зажигается при давлениях  $< 0,1$  Па. Инжекция электронов обеспечивает смещение кривой зажигания основного разряда в область более низких давлений (кривая 2 на рис. 2). Так, при токе электронов 50 мА основной разряд стабильно зажигался при давлениях вплоть до  $5 \cdot 10^{-3}$  Па. Вспомогательный разряд стабильно зажигался при расходах рабочего газа  $> 3 \cdot 10^{-3}$  Па  $\cdot$  м<sup>3</sup>/с. При этом во всем диапазоне давлений для зажигания вспомогательного разряда было достаточно напряжения 1–2 кВ.



**Рис. 2.** Зависимости напряжения зажигания разряда от давления: 1 — без вспомогательного разряда, 2 — ток вспомогательного разряда 50 мА.



**Рис. 3.** Зависимости напряжения горения разряда от площади анода:  $I = 0.5 \text{ A}$ ;  $I_a = 0.1 \text{ A}$ ;  $p, \text{ Па}$ : 1 —  $2.5 \cdot 10^{-2}$ , 2 —  $3 \cdot 10^{-2}$ .



**Рис. 4.** Зависимость напряжения горения разряда от коэффициента несамостоятельности:  $p = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ ;  $I, \text{ A}$ : 1 — 0.5, 2 — 0.2.

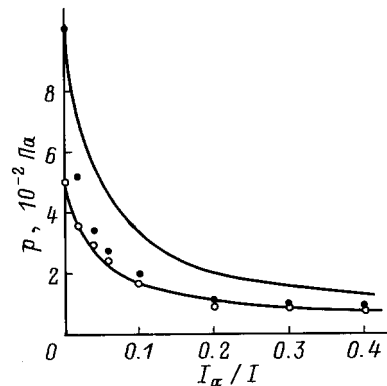
Изменение площади поверхности анода  $S_a$  оказывает существенное влияние на напряжение горения основного разряда  $U_d$  (рис. 3). Как видно из этого рисунка, существуют оптимальные значения площади анода, при которых напряжение горения минимально. Все дальнейшие измерения проводились при оптимальном отношении площадей анода и катода  $S_a/S_c$ , равном  $4.4 \cdot 10^{-3}$ .

Напряжение горения основного разряда, которое изменялось в пределах 200–800 В, зависит от давления, тока разряда  $I$ , а также от коэффициента несамостоятельности разряда (рис. 4), определяемого как отношение  $I_a/I$  токов вспомогательного и основного разрядов. Зависимости давления, при котором горит основной разряд, от коэффициента несамостоятельности разряда представлены на рис. 5. Как следует из графиков, существование вспомогательного разряда с током, не превышающим  $1/3$  от тока основного разряда, позволяет уменьшить давление в 5–10 раз, а также понизить напряжение горения основного разряда  $U_d$  до 200 В.

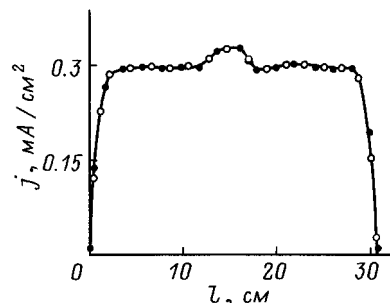
Распределения плотности тока ионного пучка, отбираемого из плазмы основного разряда, имели высокую однородность по длине эмиссионного окна (рис. 6) и практически не отличались при инжекции электронов через один или оба торца катодной полости.

### Обсуждение результатов экспериментов

Влияние инжекции электронов на смещение кривой зажигания в область более низких давлений обусловлено, на наш взгляд, как поступлением в катодную полость основного разряда быстрых, способных к ионизации электронов, так и их осцилляцией в катодной области. Эффект осцилляции значительно усиливается при создании инжектируемыми электронами первичной плазмы, существование которой приводит к локализации межэлектродного напряжения в узком катодном слое. Поскольку процесс поглощения быстрых, не испытавших столкновений, электронов катодной поверхностью маловероятен [11], а электронов, потерявших часть энергии в столкновениях, невозможен, то ускоренные в катодном слое электроны осциллируют в катодной полости, отражаясь от катодного слоя, пока не уйдут на анод. Средняя длина пробега электронов в катодной полости, определяемая вероятностью пересечения их траекторий с анодом, может быть определена согласно [9] как  $L = 4V/S_a$ , где  $V$  — объем катодной полости. В условиях эксперимента величина  $L$  составляла  $4 \cdot 10^3 \text{ см}$ . Увеличение длины пробега электронов эквивалентно увеличению межэлектродного промежутка и ведет к смещению кривой зажигания разряда в область более низких давлений.



**Рис. 5.** Зависимости рабочего давления от коэффициента несамостоятельности разряда:  $U_d = 420 \text{ В}$ ;  $I, \text{ A}$ : ● — 0.5, ○ — 0.25; кривые — теория для  $\gamma = 0.05$ .



**Рис. 6.** Распределения плотности тока ионного пучка по длине эмиссионного окна. Инжекция электронов из одной (●) и двух (○) ячеек вспомогательного разряда;  $p = 2.2 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ ;  $I = 1 \text{ A}$ ; ток (сумма токов) вспомогательного разряда 0.2 А.

В этом случае давление, при котором возможно зажигание разряда, определяемое минимумом кривой Пашена ( $pd \approx 40$  Па·см), должно составлять  $10^{-2}$  Па, что близко к значениям, наблюдаемым в эксперименте (кривая 2 на рис. 2).

Поскольку инжектируемые в катодную полость электроны ускоряются в том же катодном падении, что и  $\gamma$ -электроны, то характеристики и свойства разряда с внешней инжекцией электронов не должны сильно отличаться от соответствующих характеристик самостоятельного разряда с полым катодом. Как и в работе [9], наблюдается рост напряжения горения как при увеличении площади анода  $S_a$  в результате ухода высокоэнергетичных электронов на анод (правые ветви зависимостей рис. 3), так и при уменьшении  $S_a$  меньше значения  $S_c(2m_e/M_i)^{1/2}$  за счет образования анодного слоя (левые ветви зависимостей рис. 3).

Когда давление настолько малое, что первичные электроны встречают на своем пути анод прежде, чем истратят свою энергию, условие поддержания разряда при отсутствии инжектируемых электронов имеет вид [10]

$$n\sigma_i L = 1/\gamma, \quad (1)$$

где  $n$  — концентрация газа в катодной полости,  $\sigma_i$  — усредненное по энергии электронов сечение ионизации газа электронным ударом,  $L$  — длина пробега ускоренных в катодном слое электронов,  $\gamma$  — коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии.

Из условия (1) следует, что при низком давлении коэффициент вторичной эмиссии  $\gamma$  должен увеличиваться пропорционально уменьшению давления. Для самостоятельного разряда увеличение  $\gamma$  может осуществляться только за счет кинетической ионно-электронной эмиссии. Для этого необходимо резкое возрастание катодного падения потенциала, а следовательно, и напряжения горения разряда. Поскольку доля электронного компонента в катодном токе не превышает в тлеющем разряде 10%, то дополнительная инжекция электронов в катодную полость, ток которых составляет, например, те же 10% от тока разряда, равносильна удвоению величины  $\gamma$  без какого-либо повышения напряжения горения разряда, а дальнейший рост числа инжектируемых в плазму катодной полости электронов может приводить даже к снижению напряжения горения разряда (рис. 4). При инжекции электронов условие поддержания разряда приобретает вид

$$n\sigma_i L = (\gamma + (I_e/I_{ic}))^{-1}, \quad (2)$$

где  $I_e/I_{ic}$  — отношение тока электронов, эмиттируемых вспомогательным разрядом, к току ионов на катод основного разряда.

Поскольку в условиях экспериментов  $I_e \approx I_a$ , а  $I_{ic} = I/(1 + \gamma) \approx I$ , так как  $\gamma \ll 1$ , то зависимость давления, при котором существует разряд, от коэффициента самостоятельности разряда  $I_a/I$  может быть

представлена в виде

$$p = \frac{kT}{\sigma_i L} (\gamma + I_a/I)^{-1}, \quad (3)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура газа в катодной полости.

В случае самостоятельного разряда ( $I_a = 0$ ) выражение (3) принимает вид

$$p_0 = kT/\sigma_i L \gamma. \quad (4)$$

Значение  $p_0$  может быть определено из рис. 5 как точка пересечения кривых с осью ординат. Несмотря на приближения, сделанные при выводе выражения (3), наблюдается удовлетворительное согласие зависимости рабочего давления самостоятельного разряда от соотношения  $I_a/I$  (линии) с экспериментальными данными (точки). Рост величины  $p_0$  при увеличении тока разряда можно объяснить повышением температуры газа.

Высокая однородность плотности ионного тока эмиссии (рис. 6) определяется свойствами плазмы разряда с полым катодом низкого давления. Высокая однородность параметров плазмы обусловлена тем, что ионизирующие первичные электроны, благодаря многочисленным отражениям от катодного слоя, проходят расстояние, во много раз превышающее средний размер катодной полости, поэтому вероятность акта ионизации в любой точке катодной полости, заполненной плазмой, приблизительно одинакова. Высокая однородность плазмы обеспечивает однородное распределение плотности эмиссионного тока ионов. Распределение не искажается даже в случае инжекции в катодную полость электронов только с одного торца полого катода.

## Вывод

Таким образом, инжекция в катодную полость электронов, ускоряемых в катодном падении потенциала, позволяет понизить давление, при котором возможно устойчивое инициирование и стабильное горение низковольтной формы тлеющего разряда с полым катодом, вплоть до  $5 \cdot 10^{-3}$  Па, а создание условий для многократных осцилляций энергетичных электронов обеспечивает эффективную ионизацию газа при низком давлении и высокую однородность плазмы разряда, поэтому самостоятельный тлеющий разряд с полым катодом перспективен для генерации широкоапертурных ионных пучков.

## Список литературы

- [1] Wolf B. Handbook of Ion Sources. New York: CRC Press, 1995. 544 p.
- [2] Метель А.С. // I Всесоюз. совещание по плазменной эмиссионной электронике. Улан-Удэ, 1991. С. 77–81.
- [3] Москалев Б.И. Разряд с полым катодом. М.: Энергия, 1969. 184 с.

- [4] *Brown I.G.* The Physics and Technology of Ion Sources. New York: John Wiley & Sons. 444 p.
- [5] *Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А.* и др. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
- [6] Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / Под ред. П.М. Щанина. Екатеринбург: Наука, 1993. 149 с.
- [7] *Форрестер А.Т.* Интенсивные ионные пучки. М.: Мир, 1991. 358 с. Forrester A.T. Large Ion Beams. John Wiley & Sons, 1988.
- [8] *Окс Е.М., Чагин А.А.* // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 6. С. 1191–1193.
- [9] *Метель А.С.* // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 2. С. 241–247.
- [10] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
- [11] *Глазунов В.Н., Метель А.С.* // Физика плазмы. Т. 8. № 5. С. 1099–1104.