

Краткие сообщения

04 Инициирование разряда в плазменном источнике электронов с полым катодом

© И.С. Жирков, В.А. Бурдовицин, Е.М. Окс, И.В. Осипов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050 Томск, Россия
e-mail: burdov@fet.tusur.ru

(Поступило в Редакцию 21 ноября 2005 г.)

Представлены результаты экспериментального исследования инициирования разряда с полым катодом в плазменном источнике электронов. Инициирование осуществлялось за счет потока ионов из ускоряющего промежутка в разрядную область. Источником ионного потока был высоковольтный тлеющий разряд, возникающий в ускоряющем промежутке при давлении более 2 Па и напряжении не менее 2 кВ. Показано, что увеличение коэффициента ионно-электронной эмиссии катода, достигаемой выбором пары газ–металл, снижает минимальное пороговое значение ионного тока, необходимое для зажигания разряда при фиксированном разрядном напряжении.

PACS: 52.50.Dg

Разряд с полым катодом широко применяется в качестве генератора плазмы в источниках электронов [1]. Одна из проблем, возникающих при работе с источниками, состоит в обеспечении надежного инициирования разряда, поскольку напряжение зажигания U_b может существенно превышать напряжение U_d , при котором разряд устойчиво существует в непрерывном режиме. Даже при сравнительно высоком давлении газа (1–10 Па) величина U_b может составлять несколько киловольт, в то время как U_d не превышает нескольких сотен вольт. Это вынуждает создавать специальные устройства инициирования разряда (поджига), в качестве которых используются искровые промежутки, накаливаемые элементы [2], электроды, помещаемые внутрь полости [3]. В устройствах, работающих с непрерывным напуском газа, для инициирования тлеющего разряда с полым катодом используют его комбинацию с другими разрядными системами, например, пеннинговской или магнетронной [4], сообщающимися с катодной полостью через малое отверстие, обеспечивающее перепад давления. Задачей любой системы инициирования является создание дополнительных заряженных частиц и их инжекции в разрядный промежуток.

В так называемых форвакуумных плазменных источниках электронов, функционирующих при давлении газа вплоть до 10–15 Па [5,6], появляется еще одна возможность инициирования разряда, а именно использование для этих целей ионного потока в разрядную область из ускоряющего промежутка за счет возникающего в нем при таком давлении высоковольтного тлеющего разряда (ВТР). Цель настоящей работы состоит как в измерении характеристик ВТР, так и в определении условий зажигания разряда с полым катодом, исследовании зависимостей пороговых значений ионного тока,

вызывающего зажигание разряда, от материала катода, давления и рода рабочего газа.

Техника эксперимента

Схема экспериментального устройства приведена на рис. 1. Электронный источник содержит разрядную систему, включающую полый катод 1, анод 2 с эмиссионным окном 3, перекрытым мелкоструктурной сет-

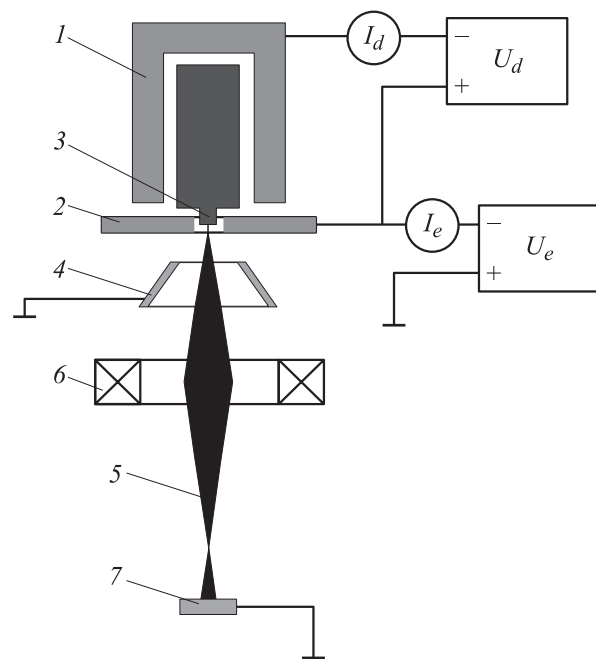


Рис. 1. Плазменный источник электронов.

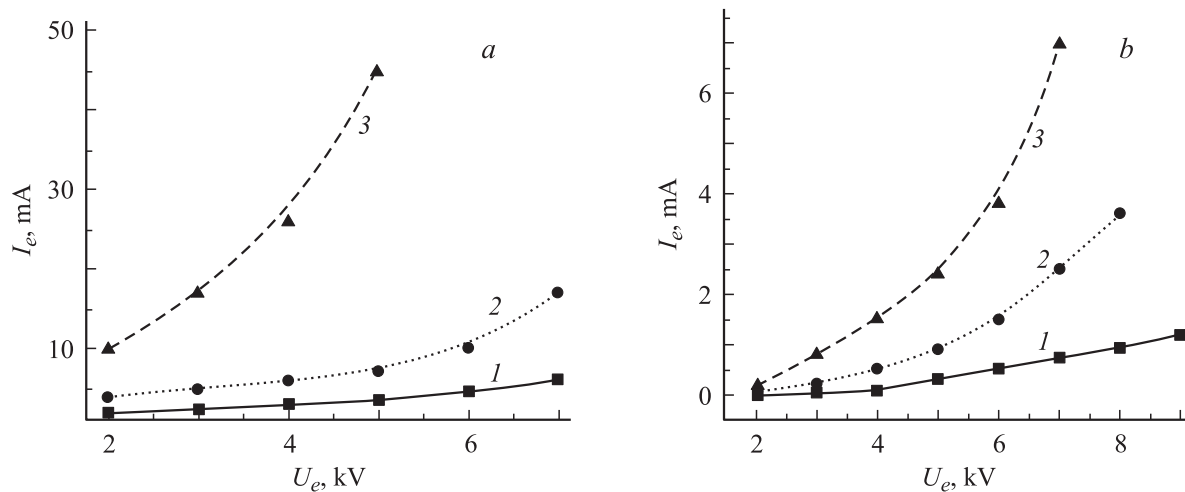


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики ВТР при различном расстоянии d анод–ускоряющий электрод: a — 5.5, b — 0.7 см и давления p : 1 — 4, 2 — 5, 3 — 6 Па. Газ — воздух.

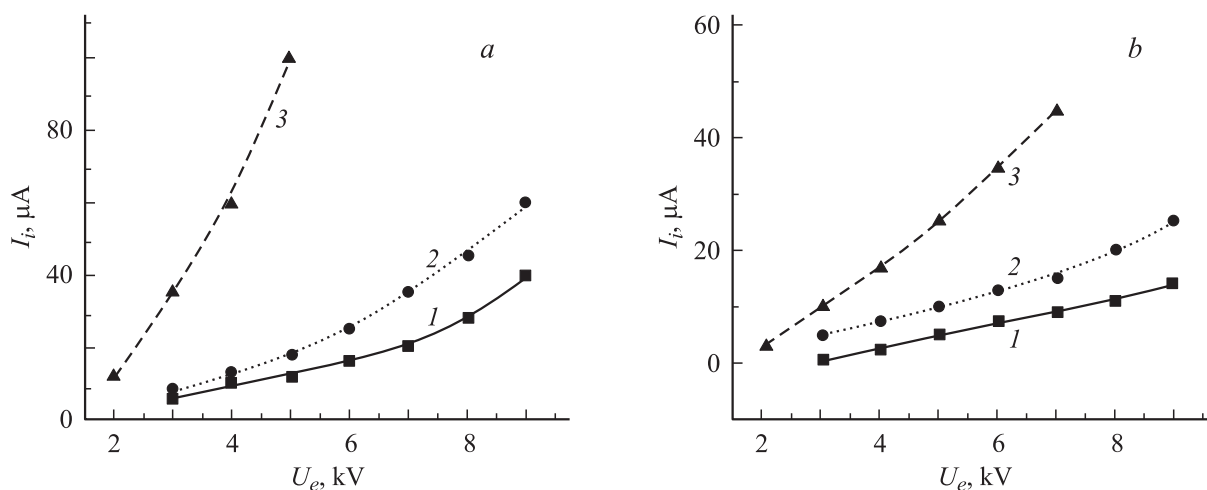


Рис. 3. Ионный ток I_i на катод в зависимости от ускоряющего напряжения U_e при различном расстоянии d анод–ускоряющий электрод. Параметры те же, что и на рис. 2.

кой, ускоряющий промежуток, образованный анодом 2 и ускоряющим электродом 4, а также коллектор 7. Фокусировка электронного пучка 5 осуществляется магнитной линзой 6. К разрядному и ускоряющему промежуткам прикладываются постоянные напряжения U_d и U_e соответственно. Плазменная эмиссионная граница формируется в эмиссионном окне 3. Ускоряющее напряжение снижает или устраняет потенциальный барьер на границе плазмы, что способствует эмиссии электронов и формированию пучка. Подробное описание конструкции и работы источника приведено в [6]. В настоящей работе зажигание разряда с полым катодом осуществлялось в следующей последовательности: сначала на разрядный промежуток подавалось напряжение $U_d = 500$ В, затем при плавном повышении U_e происходило зажигание разряда. Измерение тока ионов, попадающих в катодную полость из ускоряющего промежутка, производилось при $U_d = 0$.

Результаты экспериментов и обсуждение

Как показали эксперименты, в условиях функционирования форвакуумного плазменного источника электронов в отсутствие напряжения на разрядном промежутке при $U_e > 2$ кВ и давлении газа выше 2 Па в цепи источника ускоряющего напряжения регистрируется ток в несколько миллиампер. Появление такого тока несомненно свидетельствует о возникновении в ускоряющем промежутке плазменного источника электронов стационарного ВТР. Об этом же свидетельствует и появление характерного фиолетового свечения. Как и следовало ожидать [2], ток ВТР возрастает как с повышением ускоряющего напряжения, так и с увеличением давления газа и протяженности промежутка (рис. 2). Аналогичным образом зависит от ускоряющего напряжения и давления газа ток, регистрируемый прибором I_d в цепи полого

катода и рассматриваемый нами как ионный ток, поступающий в катодную полость (рис. 3). Зависимость этого тока от прозрачности эмиссионного окна (рис. 4), однозначно свидетельствует о том, что он является именно током ионов из ускоряющего промежутка.

При возникновении ВТР в ускоряющем промежутке повышение ускоряющего напряжения и соответственно увеличение тока ионов, проникающих в разрядную область, способствуют зажиганию разряда с полым катодом. Такое влияние иллюстрируется результатами, представленными на рис. 5, когда при увеличении напряжения в ускоряющем промежутке наблюдается скачкообразное возрастание тока в разрядном промежутке между полым катодом 1 и анодом 3 (рис. 1), если между ними приложено напряжение от источника питания разряда. Изменение величины ускоряющего напряжения, протяженности ускоряющего промежутка и давления газа показало, что критическим параметром, определяющим момент зажигания разряда, является именно величина

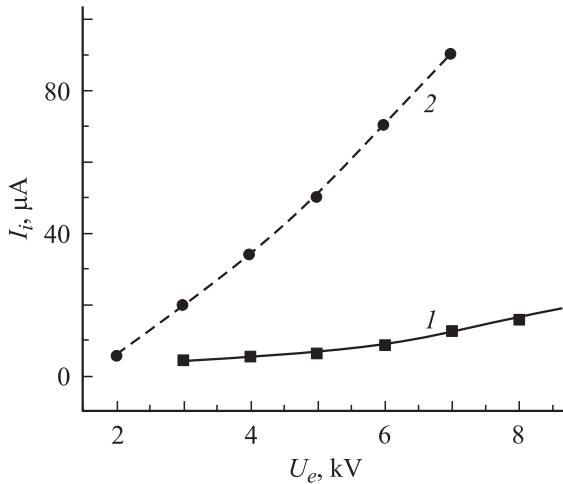


Рис. 4. Ионный ток I_i на катод в зависимости от ускоряющего напряжения U_e при различной прозрачности сеток: 1 — 6.5%; 2 — 16%. Давление 6 Па.

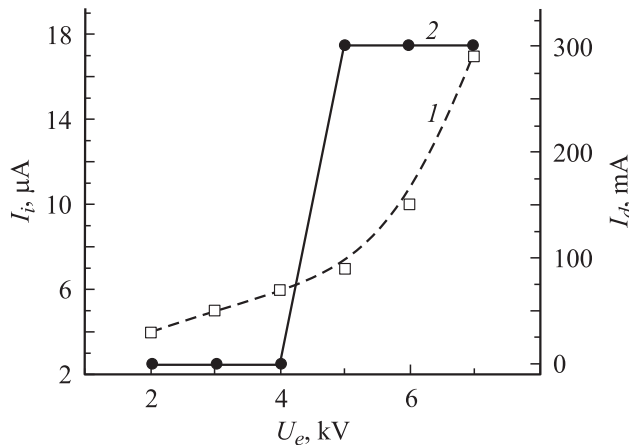


Рис. 5. Зависимость тока разряда от напряжения на ускоряющем промежутке ($U_d = 500$ В, $p = 4$ Па). Пунктиром показан ионный ток $I_i(I)$ в цепи полого катода при $U_d = 0$; I_d (2).

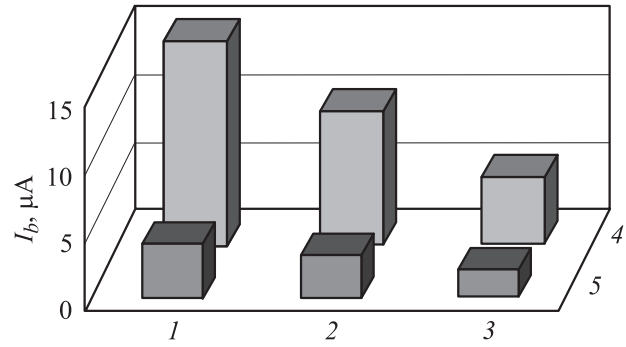


Рис. 6. Пороговый ионный ток зажигания разряда для различных сочетаний газ (1 — воздух, 2 — аргон, 3 — гелий) — материал катода (4 — сталь, 5 — алюминий) $U_d = 500$ В, $p = 3$ Па.

тока ионов из ускоряющего промежутка в катодную полость. Вследствие малой ионизационной способности ионов их роль, скорее всего, связана с катодными процессами, а именно с вызываемой ими ионно-электронной эмиссией. Это должно проявляться в зависимости порогового ионного тока зажигания разряда от рода газа и материала катода — параметров, определяющих, как известно [7], коэффициент ионно-электронной эмиссии. Для проверки этого предположения были проведены эксперименты с различными газами (воздух, аргон, гелий) и материалами катода (нержавеющая сталь, алюминий). Результаты, представленные на рис. 6, свидетельствуют о том, что для сортов ионов и материалов катода, обеспечивающих больший коэффициент ионно-электронной эмиссии [8] требуется меньший ток ионов из ускоряющего промежутка для зажигания разряда.

Качественное объяснение полученных результатов может быть проведено с помощью простых соображений. Если выбрать в качестве условия зажигания самостоятельного разряда известное выражение [7]

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1, \quad (1)$$

где γ — коэффициент ионно-электронной эмиссии, α — коэффициент Таунсенда, d — эффективный путь электрона, то случай, когда при данных U_d и p разряд не загорается, может быть описан неравенством

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) < 1. \quad (2)$$

Невозможно зажечь разряд вследствие недостаточного количества ионов, порождаемых одним электроном до момента его выхода из полости и попадания на анод. Очевидно, что влияние ионов, поступающих в полость извне, может быть учтено введением в (1) дополнительного слагаемого

$$\gamma_1(e^{\alpha d} - 1) + \gamma_2 N_m = 1, \quad (3)$$

здесь N_m есть минимальное количество дополнительных ионов в расчете на один вторичный электрон, при котором (3) имеет место. В силу различных энергий ионов

коэффициенты γ_1 и γ_2 могут различаться. Выражение (3) указывает на пороговый характер зажигания разряда. Ясно, что до тех пор, пока количество N поступающих в разряд ионов меньше N_m , зажигание разряда невозможно. Влияние материала катода и рода газа учитывается величинами γ_1 и γ_2 . С увеличением этих коэффициентов зажигание разряда возможно при меньшем N_m , что и наблюдается в эксперименте.

Заключение

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что в плазменном источнике электронов, функционирующем в области повышенных (форвакуумных) давлений, возможно стабильное инициирование плазмообразующего разряда за счет использования обратного ионного потока из ускоряющего промежутка при возникновении в нем высоковольтного тлеющего разряда. Соответствующий выбор пары: род плазмообразующего газа — материал катода, обеспечивающий максимальное значение коэффициента ионно-электронной эмиссии с катода, приводит к снижению минимального ионного тока, необходимого для зажигания разряда.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 05-02-98000-р_обь_а и 05-08-01319-а).

Список литературы

- [1] Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. Томск: Изд-во НТЛ, 2005. 216 с.
- [2] Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новикова А.А., Шантурин Л.П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
- [3] Гаврилов Н.В., Осипов В.В., Буреев О.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 3. С. 72–78.
- [4] Osipov I., Remppe N. // Rev. Sci. Instrum. 2000. Vol. 71. N 3. P. 1–4.
- [5] Бурдовицин В.А., Бурачевский Ю.А., Окс Е.М. и др. // Изв. вузов. Физика. 2001. № 9. С. 85–89.
- [6] Burdovitsin V., Oks E. // Rev. Sci. Instrum. 1999. Vol. 70. N 7. P. 2975–2978.
- [7] Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966.
- [8] Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.