

04;10;12

## Особенности генерации низкоэнергетичных электронных пучков большого сечения из плазменного источника электронов пеннинговского типа

© В.Н. Бориско, А.А. Петрушеня

Харьковский национальный университет,  
61108 Харьков, Украина  
e-mail: Borisko@pht.univer.kharkov.ua

(Поступило в Редакцию 10 января 2002 г.)

Экспериментально исследован широкоапертурный плазменный источник низкоэнергетичных электронов, выполненный на базе электрически несимметричного отражательного разряда. Исследованы особенности и определены положения границ режима генерации электронного пучка. Проведен сравнительный анализ влияния размеров и формы разрядных электродов на характеристики источника. Определен способ эффективного управления током электронного пучка.

### Введение

В настоящее время электронные пучки большого сечения находят широкое применение в различных технологических процессах: для отжига металлов и полупроводников [1], для накачки электроионизационных лазеров, в радиационной и электронно-лучевой технологии, в плазмохимии и в других областях [2]. В большинстве случаев для получения электронных пучков большого сечения наиболее целесообразно использование плазменных источников электронов ПИЭЛ, что обусловлено широким диапазоном параметров пучков электронов получаемых с их помощью. Основными требованиями, предъявляемыми к таким источникам, являются формирование в эмиссионной области неоднородной плазмы с повышенной плотностью, малый поток нейтралов рабочего газа в ускоряющий промежуток, эффективное управление током электронного пучка, минимальные затраты мощности на формирование плазмы и достаточно большой ресурс работы. Этим требованиям во многом удовлетворяют ПИЭЛ на основе отражательных разрядов с холодными катодами. Источники данного типа могут эффективно работать с химически активными рабочими газами в условиях интенсивной ионной бомбардировки и периодическими контактами с атмосферой, обеспечивают устойчивые режимы работы ПИЭЛ при малых разрядных токах, обладают высокой газовой экономичностью, простой конструкцией и надежны в работе.

В большинстве существующих ПИЭЛ на основе отражательных разрядов с холодными катодами извлечение электронов из плазмы разряда осуществляется за счет высоких вытягивающих напряжений, прикладываемых между плазмой и извлекающим электродом. В этих источниках эмиссия электронов в ускоряющий промежуток осуществляется из плазмы разряда через отверстие малого сечения, что затрудняет их использование для получения электронных пучков большого сечения. Однако при определенных внешних параметрах

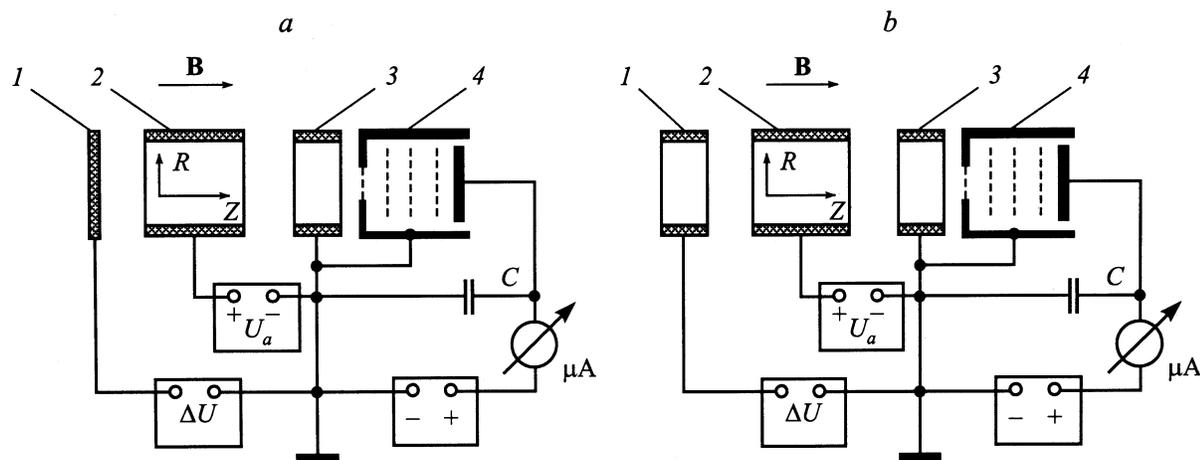
разряда такого типа, когда в области разряда преобладает отрицательный пространственный заряд, возможен выброс „аномальных“ электронов в аксиальном направлении [3,4]. В этом случае эмиссия электронов возможна без использования вытягивающих электродов только за счет энергии, которую они приобретают при взаимодействии с высокочастотными колебаниями, возбуждаемыми в области анодного слоя. Отсутствие извлекающего электрода дает возможность извлекать низкоэнергетичные пучки электронов, а также расширить апертуру эмиссионного отверстия до поперечных размеров анода. Однако существование таких режимов в отражательном разряде остается практически неизученным.

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования влияния внешних параметров разряда на режимы генерации низкоэнергетичных электронных пучков из широкоапертурного плазменного источника электронов, выполненного на базе электрически несимметричного отражательного разряда.

### Техника эксперимента

Эксперименты проводились с двумя конфигурациями разрядных электродов пеннинговского типа (рис. 1), которые находились в однородном магнитном поле, направленном вдоль оси системы. Первая конфигурация электродов (рис. 1, а) состояла из цилиндрического анода и двух отражательных электродов, один из которых был плоским 1, а второй — цилиндрическим 3. Во второй конфигурации (рис. 1, б) все электроды были цилиндрическими. Цилиндрические электроды были изготовлены из нержавеющей стали, а плоский — из дюралюминия.

В ходе экспериментов использовались системы разрядных электродов с диаметрами  $d = 18, 30$  и  $80$  мм. При этом всегда сохранялось подобие: межэлектродные расстояния катод-анод и длины цилиндрических катодов были равны радиусу, а длина анода — диаметру



**Рис. 1.** Схема плазменного источника электронов: *a* — конфигурация электродов с плоским катодом; *b* — конфигурация электродов с цилиндрическими катодами.

электродов. Исследования проводились в стационарном режиме горения разряда. Использовались как электрически симметричное, так и несимметричное включение разрядных электродов. В первом случае оба катода (*1*, *3*) находились под одинаковым потенциалом, равным потенциалу земли, а на анод (*2*) подавался положительный потенциал. Во втором случае катод *3* был заземлен, а разность потенциалов между катодами *1* и *3* изменялась в пределах  $\Delta U = (-500 - +500)$  В.

Исследования проводились при давлении рабочего газа (водород, воздух)  $P = 0.01 - 1 \cdot 10^{-3}$  Торр, индукции магнитного поля  $B = 0.01 - 0.1$  Т, анодном напряжении  $U_a = 0.5 - 3.5$  кВ и разрядных токах  $I_p = 0.1 - 100$  мА. Плотность плазмы  $n_e \sim 0.1 - 2 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup> и температура электронов  $T_e = 5 - 20$  эВ определялись зондовой методикой. Остаточное давление в вакуумной камере не превышало  $4 \cdot 10^{-6}$  Торр.

Электронный пучок извлекался из разряда в аксиальном направлении со стороны катода *3*. Радиальное распределение плотности тока пучка заряженных частиц, извлекаемых из разряда вдоль оси системы, и их энергия в продольном направлении исследовались с помощью передвижного многосеточного электростатического энергоанализатора *4*.

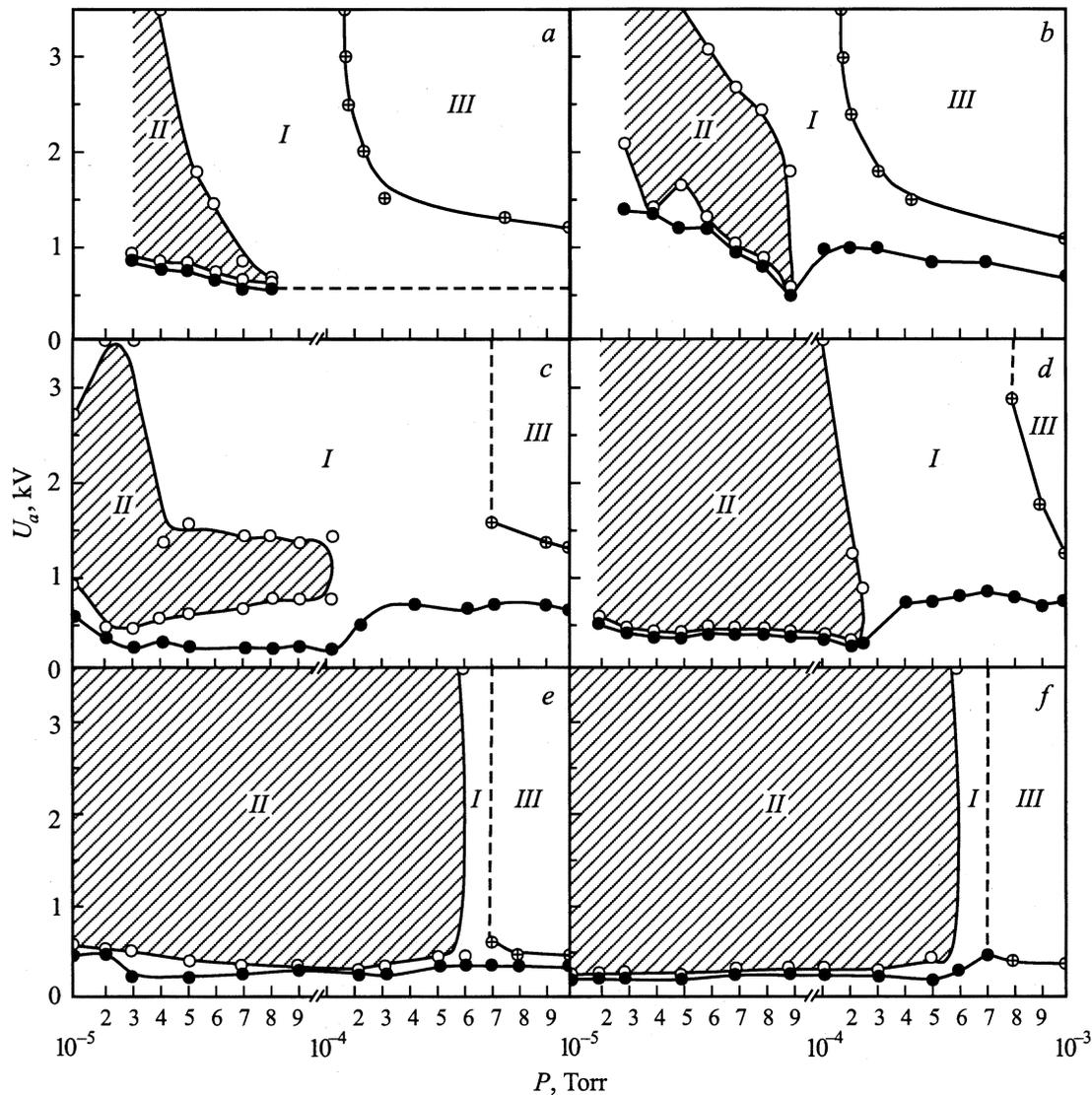
Волновые процессы в плазме исследовались экранированными одиночными цилиндрическими зондами, которые находились под плавающим потенциалом и нагружались на емкостной делитель обладающий высоким импедансом в данном диапазоне частот.

## Результаты экспериментов

Существование в отражательном разряде различных режимов горения существенно влияет не только на параметры разряда, но и на свойства плазмы, эмитирующей электроны [2]. Положение границ режимов горения разрядов такого типа зависит от падения анодного напряжения, напряженности внешнего магнитного

поля, давления и сорта рабочего газа, а также от геометрических параметров разряда [5]. Исходя из этого была экспериментально исследована взаимосвязь между различными режимами горения разряда, его геометрией и режимами генерации электронных пучков. Области внешних параметров разряда (анодное напряжение  $U_a$  и давление рабочего газа  $P$ ), соответствующие этим режимам, показаны на рис. 2. Во всех случаях генерация электронных пучков наблюдалась только в высоковольтном режиме горения разряда. При использовании вместо воздуха более легкого рабочего газа — водорода, а также с уменьшением диаметра разрядных электродов границы режима генерации электронных пучков расширялись в область более высоких давлений рабочего газа и анодных напряжений. Подобные зависимости были характерны и для случаев, когда применялась электрически несимметричная схема включения отражательных электродов при отрицательных значениях  $\Delta U$ . Для систем разрядных электродов с плоским катодом с уменьшением их диаметра до 18 мм для обоих сортов рабочих газов генерация электронных пучков наблюдалась почти во всей области высоковольтного режима горения разряда (рис. 2, *e, f*).

Изучение радиальных распределений потенциалов и плотностей плазмы соответствующих режиму генерации электронного пучка показало, что данный режим характеризуется резким снижением потенциала плазмы (рис. 3, *a*, кривые 1–3) и одновременным возрастанием ее плотности (рис. 3, *b*, кривые 1–3) в центральной области разряда по сравнению с их значениями, когда генерация электронного пучка не наблюдалась (рис. 3, *a, b*, кривые 4, 5). Применение электрически несимметричной схемы включения отражательных электродов ( $\Delta U = -500$  В) приводило к дальнейшему понижению потенциала плазмы (рис. 3, *a*, кривая 2) и одновременному повышению ее плотности (рис. 3, *b*, кривая 2). Когда в качестве рабочего газа использовался воздух, потенциал плазмы (рис. 3, *a*, кривая 3)

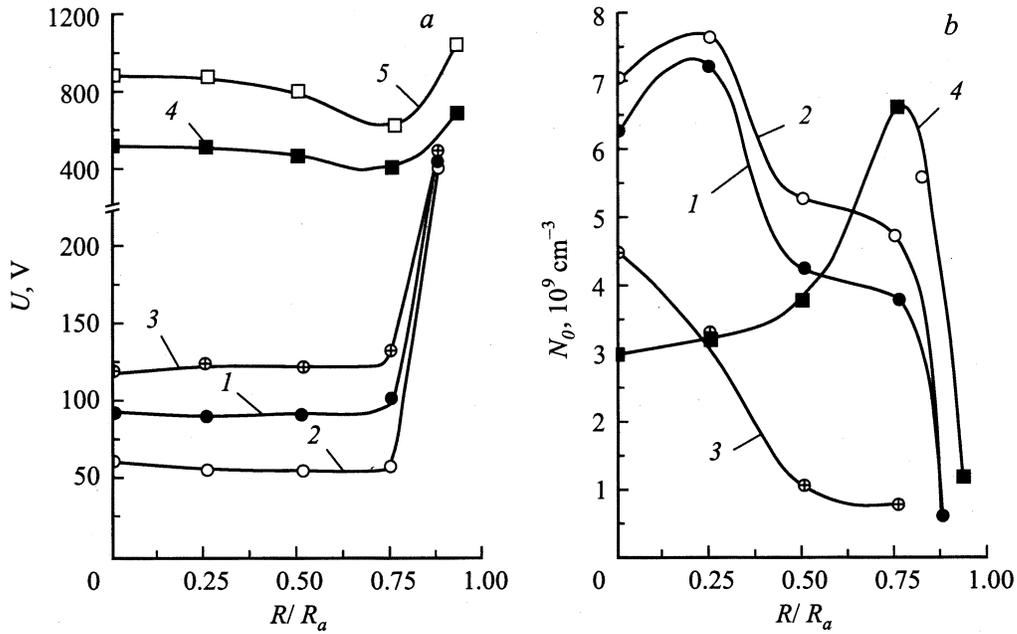


**Рис. 2.** Режимы горения разряда и генерации электронного пучка. *I* — высоковольтный режим, *II* — режим генерации электронного пучка, *III* — сильноточный режим. • — граница существования разряда, ○ — граница режима генерации электронного пучка ⊗ — граница сильноточного режима горения разряда. *a, b* — цилиндрические электроды диаметром 80 мм; *c, d* — цилиндрические электроды диаметром 18 мм; *e, f* — электроды с плоским катодом диаметром 18 мм; *a, c, e* — рабочий газ воздух; *b, d, f* — рабочий газ водород; *a, b, d, e, f* —  $B = 0.06$  Т,  $\Delta U = 0$ ; *c* —  $B = 0.06$  Т,  $\Delta U = -500$  В.

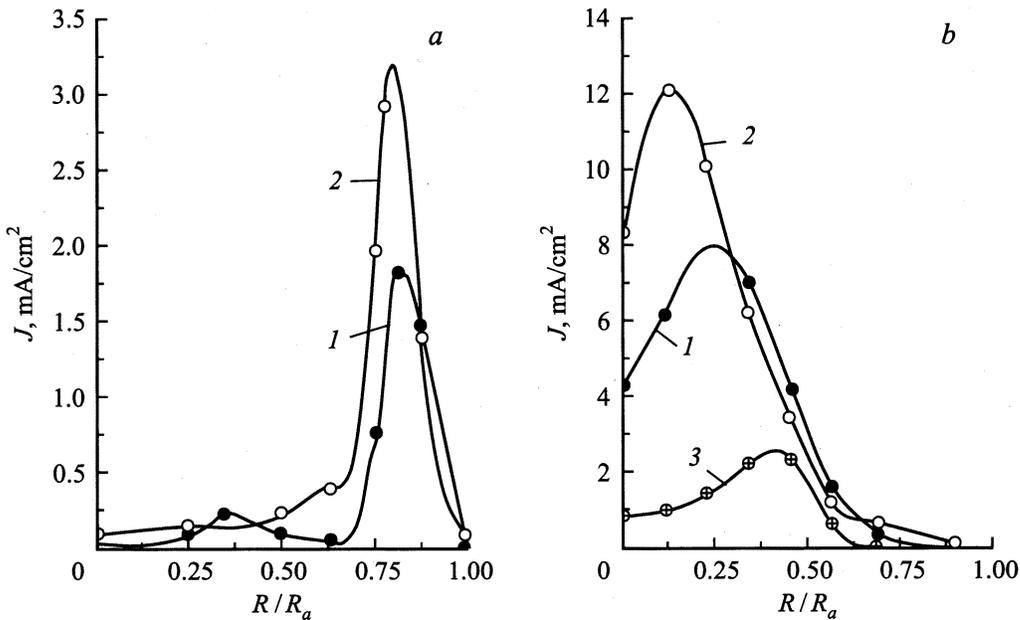
принимал более высокие, а плотность плазмы (рис. 3, *b*, кривая 3) — более низкие значения, чем для рабочего газа водорода. В режиме генерации электронного пучка в анодном слое разряда наблюдались интенсивные высокочастотные дрейфовые колебания в диапазоне частот  $f \sim 10\text{--}55$  МГц. Частота данных колебаний зависела как от внешних параметров разряда, так и от диаметра разрядных электродов и сорта рабочего газа. С уменьшением диаметра разрядных электродов, а также массы рабочего газа частота колебаний возрастала.

Радиальная структура эжектируемого электронного пучка для всех систем разрядных электродов была неоднородной и имела максимум на некотором расстоянии от оси системы (рис. 4), положение и интенсив-

ность которого зависели от напряженности внешнего магнитного поля  $H$ , падения анодного напряжения  $U_a$ , разности потенциалов между катодами  $\Delta U$ , давления  $P$  и сорта рабочего газа, а также от формы и диаметра разрядных электродов. Степень неоднородности электронного пучка уменьшалась, когда применялись плоские катоды, а также с уменьшением диаметра разрядных электродов (рис. 4, *b*). При использовании вместо воздуха (рис. 4, *b*, кривая 3) более легкого рабочего газа водорода (рис. 4, *b*, кривые 1, 2) наблюдались увеличение плотности тока пучка электронов и смещение его максимума к оси системы. Электрическая асимметрия в системе ( $\Delta U = -500$  В) позволяла получать еще большие значения плотности тока пучка электронов.



**Рис. 3.** Радиальное распределение потенциала (*a*) и плотности плазмы (*b*) со стороны катода 3. Цилиндрические электроды диаметром 80 мм. 1 — рабочий газ водород,  $P = 9 \cdot 10^{-5}$  Торр,  $B = 0.06$  Т,  $U_a = 1.5$  кВ,  $\Delta U = 0$ ; 2 — рабочий газ водород,  $P = 9 \cdot 10^{-5}$  Торр,  $B = 0.06$  Т,  $U_a = 1.5$  кВ,  $\Delta U = -500$ ; 3 — рабочий газ воздух,  $P = 4 \cdot 10^{-5}$  Торр,  $B = 0.06$  Т,  $U_a = 1.5$  кВ,  $\Delta U = 0$ ; 4 — рабочий газ водород,  $P = 10^{-4}$  Торр,  $B = 0.06$  Т,  $U_a = 1.5$  кВ,  $\Delta U = 0$ ; 5 — рабочий газ водород,  $P = 9 \cdot 10^{-5}$  Торр,  $B = 0.023$  Т,  $U_a = 1.5$  кВ,  $\Delta U = 0$ .

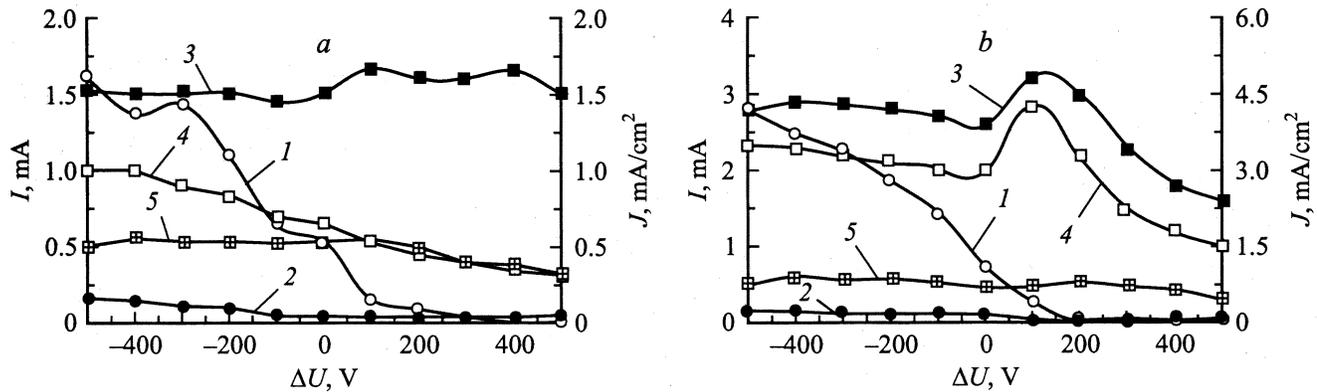


**Рис. 4.** Радиальное распределение плотности тока пучка электронов за катодом 3 (см. рис. 1). 1, 2 — рабочий газ водород, 3 — рабочий газ воздух; *a* — цилиндрические электроды диаметром 80 мм.  $P = 9 \cdot 10^{-5}$  Торр,  $B = 0.06$  Т,  $U_a = 1.5$  кВ; 1 —  $\Delta U = 0$ , 2 —  $\Delta U = -500$  В. *b* — электроды с плоским катодом диаметром 18 мм.  $P = 9 \cdot 10^{-5}$  Торр,  $B = 0.08$  Т,  $U_a = 1.5$  кВ; 1, 3 —  $\Delta U = 0$ , 2 —  $\Delta U = -500$  В.

В этом случае при оптимальных значениях внешних параметров разряда плотность тока пучка электронов достигала значения  $J = 30\text{--}40$  мА/см<sup>2</sup>. Энергия пучка составляла  $E = 5\text{--}10$  эВ, энергетическая эффективность

источника  $h = 0.3\text{--}0.6$  мА/Вт, а эффективность извлечения электронов  $\alpha = 70\text{--}90\%$ .

Необходимо отметить, что с увеличением плотности тока пучка электронов наблюдалось одновременное



**Рис. 5.** Зависимости плотностей токов пучков электронов ( $I$ ) и ионов ( $2$ ), разрядного тока ( $3$ ), токов на катод  $4$  и на катод  $5$  от величины  $\Delta U$ . Рабочий газ — воздух.  $P = 9 \cdot 10^{-5}$  Torr,  $U_a = 1.5$  kV,  $B = 0.08$  Т.  $a$  — цилиндрические электроды диаметром 18 mm,  $b$  — плоский и цилиндрический электроды диаметром 18 mm.

понижение потенциала плазмы в центральной области разряда. Это обстоятельство свидетельствует о том, что выброс, или, скорее всего, истечение электронов в аксиальном направлении, имеет также и электростатическую природу.

Во всех случаях ток пучка электронов был промодулирован высокочастотными дрейфовыми колебаниями.

Наиболее вероятная энергия электронов в пучке составляла 5–80 eV и зависела от геометрии разрядных электродов и сорта рабочего газа. Для водорода она принимала более низкие значения (5–10 eV), чем для воздуха (40–80 eV). Кроме того, в случае применения конфигураций с плоским катодом в энергетических спектрах наблюдались также электроны с энергией, соответствующей разности потенциалов между катодами  $\Delta U$ . С уменьшением диаметра разрядных электродов их доля в энергетическом спектре понижалась.

Также было изучено влияние степени электрической асимметрии в системе на величины плотностей токов ионов и электронов, одновременно извлекаемых из разряда. Как видно из рис. 5, в области отрицательных значений  $\Delta U$  плотность электронного тока значительно превышала плотность тока ионов. Путем варьирования величины  $\Delta U$  можно было эффективно управлять током электронного пучка. В этом случае разрядный ток для систем с цилиндрическими электродами практически не зависел от разности потенциалов между катодами  $\Delta U$  (рис. 5,  $a$ ), а для конфигурации электродов с плоским катодом такая зависимость наблюдалась в диапазоне  $\Delta U = -100$ –500 V (рис. 5,  $b$ ). Подобные зависимости были характерны для всех систем разрядных электродов и всех сортов рабочих газов.

Кроме того, как видно из рис. 5, при некоторых значениях  $\Delta U > 0$  наблюдалась токовая компенсация ионного пучка, эжектируемого одновременно с электронным. Положение зоны токовой компенсации в продольном направлении зависело от величины  $\Delta U$ . Возрастание  $\Delta U$  в область положительных значений приводило к удалению зоны компенсации от эмиссионного отверстия.

## Выводы

Экспериментально исследованы режимы генерации электронных пучков из источника пеннинговского типа с различной геометрией разрядных электродов. Изучено влияние геометрических факторов (форма и диаметр разрядных электродов), сорта рабочего газа и электрической несимметрии в системе на положение границ режима генерации электронных пучков. Показано, что генерация электронных пучков из источника наблюдалась только в высоковольтном режиме горения разряда. Режим генерации электронных пучков характеризуется более низкими величинами потенциала плазмы и более высокими значениями ее плотности в центральной области разряда по сравнению с режимами, когда эжекция электронов отсутствовала. С уменьшением диаметра разрядных электродов, а также при использовании более легкого рабочего газа границы режима генерации электронных пучков расширяются в область более высоких давлений рабочего газа и анодных напряжений. Предложен способ управления током пучка электронов путем изменения разности потенциалов между катодами. Получены пучки электронов с плотностью тока  $J = 30$ –40 mA/cm<sup>2</sup> и энергией пучка 5–10 eV. Энергетическая эффективность источника составила  $h = 0.3$ –0.6 mA/W, а эффективность извлечения электронов —  $\alpha = 70$ –90%.

## Список литературы

- [1] Крендель Ю.Е., Лебедева Н.И., Мартенс В.Я. и др. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. Вып. 23. С. 1465–1468.
- [2] Крендель Ю.Е. Плазменные источники электронов. М.: Атомиздат, 1977.
- [3] Барзударов Э.М., Кервалишвили Н.А., Кортхонджия В.П. // ЖТФ. 1972. Т. 42. Вып. 9. С. 1904–1908.
- [4] Кервалишвили Н.А. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 2. С. 78–84.
- [5] Рейхрудель Э.М., Смирницкая Г.В., Егизарян Г.А. // ЖТФ. 1973. Т. 43. Вып. 1. С. 130–135.