

04;12

## Особенности аксиальной эволюции энергетических спектров электронных пучков, эжектируемых из пеннинговского разряда

© В.Н. Бориско<sup>1</sup>, А.А. Петрушеня<sup>2</sup><sup>1</sup> Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина,  
61108 Харьков, Украина<sup>2</sup> Институт физики плазмы Национального научного центра „Харьковский физико-технический институт“,  
61108 Харьков, Украина  
e-mail: a.petrushenya@kipt.kharkov.ua

(Поступило в Редакцию 11 апреля 2006 г.)

Представлены результаты экспериментального исследования формирования энергетических спектров электронных пучков, эжектируемых из пеннинговского разряда в аксиальном направлении. Установлены основные закономерности аксиальной эволюции усредненных во времени энергетических спектров аномально быстрых электронов. Обнаружено и объяснено существование в энергетических спектрах нескольких групп электронов с различной энергией. Определено влияние геометрии разрядных электродов, электрической асимметрии между катодами, а также массового числа рабочего газа на энергетические спектры эжектируемого электронного пучка. Предложена физическая модель, объясняющая процесс формирования энергетических спектров аномально быстрых электронов в газоразрядных системах пеннинговского типа.

PACS: 52.80.Sm

### Введение

В работе [1] была показана возможность создания эффективного плазменного пеннинговского источника низкоэнергетичных электронных пучков, в котором извлечение электронов происходит без использования вытягивающих напряжений. Эмиссия электронов из плазмы данного источника осуществляется за счет энергии, которую электроны набирают при взаимодействии с интенсивными высокочастотными колебаниями отрицательного пространственного заряда [2–4]. Данные колебания вызваны дрейфовым движением азимутальной неоднородности заряженной плазмы в области анодного слоя пеннинговского разряда. Выброс аномально быстрых электронов происходит из азимутальной области разряда, где в данный момент находится азимутальная неоднородность. Энергетические спектры аномально быстрых электронов на выходе из разряда имеют немаксвелловское распределение и расширяются в область больших энергий при увеличении величин анодного напряжения и магнитного поля. Наиболее вероятная энергия аномально быстрых электронов зависит от потенциала, приложенного к катодам [5]. В работах [6,7] было показано, что наиболее вероятная энергия аномально быстрых электронов также зависит от напряженности магнитного поля и длины разрядного промежутка. Существуют различные предположения относительно механизма образования электронов с аномально большой энергией [8,9], однако удовлетворительного объяснения всех наблюдаемых явлений до сих пор не существует. Остается невыясненной динамика набора аномально быстрыми электронами дополнительной энергии в раз-

рядном промежутке, а также механизм формирования их энергетических спектров в аксиальном направлении.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального изучения процесса формирования энергетических спектров электронных пучков, эжектируемых из пеннинговского разряда в аксиальном направлении.

### Экспериментальная установка и основные методики измерений

В экспериментах использовались две конфигурации разрядных электродов пеннинговского типа. Конструкции и электрические схемы включений систем разрядных электродов подробно описаны в работе [1]. В первой конфигурации все электроды были цилиндрическими, во второй один из катодов был плоским. В исследованиях применялись системы разрядных электродов различного диаметра  $D = 18, 80$  мм. Межэлектродные расстояния катод–анод и длина цилиндрических катодов во всех случаях были равны радиусу электродов. В системах разрядных электродов диаметром 18 мм длина анода равнялась  $L_a = D$ . В системах разрядных электродов диаметром 80 мм применялись аноды длиной  $L_a = 1, 1.5, 1.75D$ . Использовалось как электрически симметричное, так и несимметричное включение катодов. Разность потенциалов между катодами изменялась в диапазоне  $\Delta U$  от  $-500$  до  $+500$  В. Эксперименты проводились в стационарном режиме горения разряда при давлении рабочего газа (воздух, водород)  $P = (0.01–1) \cdot 10^{-3}$  Торр, индукции магнитного поля  $B = 0.01–0.1$  Т, анодном напряжении  $U_a = 0.1–3.5$  кВ и разрядных токах  $I_a = 0.1–100$  мА.

Исследование усредненных во времени энергетических спектров anomalно быстрых электронов осуществлялось с помощью передвижного четырехсеточного электростатического энергоанализатора. Энергоанализатор располагался со стороны цилиндрического катода, который во время экспериментов всегда находился под потенциалом земли. Внешний диаметр энергоанализатора равнялся 12 mm. Отбор заряженных частиц из разряда осуществлялся через торцевое отверстие в энергоанализаторе диаметром 2 mm, затянутое металлической сеткой. Потенциал входной сетки устанавливался равным потенциалу земли.

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

### Эволюция энергетических спектров anomalно быстрых электронов в аксиальном направлении

Изучение энергетических спектров anomalно быстрых электронов проводилось в режимах, когда наблюдалась эжекция электронных пучков из плазмы пеннинговского разряда в аксиальном направлении. Энергоанализатором регистрировались anomalно быстрые электроны, продольная энергия которых превышала величину потенциального барьера между плазмой и заземленной входной сеткой энергоанализатора.

На рис. 1 показана эволюция продольных энергетических спектров электронов в аксиальном направлении на радиусе, где находится максимум плотности тока эжектируемого электронного пучка. Как видно из рисунка, в энергетических спектрах наблюдается несколько групп электронов с разной энергией. По мере удаления от анода в аксиальном направлении происходит обрезание энергетических спектров в низкоэнергетической области. В области бокового среза анода (кривая 1) наблюдаются две основные группы электронов. Наиболее вероятная энергия менее энергетичной группы составляет  $E = 15$  eV. Более энергетичная группа имеет наиболее вероятную энергию  $E = 40-45$  eV. В области внутреннего среза цилиндрического катода (кривая 2) в энергетическом спектре также наблюдается группа электронов с наиболее вероятной энергией  $E = 40-45$  eV. Однако менее энергетичная группа электронов с наиболее вероятной энергией  $E = 15$  eV исчезает из энергетического спектра, а в спектре появляются новые группы электронов с более высокой наиболее вероятной энергией  $E = 75-90$  eV. При дальнейшем удалении от анода к внешнему срезу цилиндрического катода (кривая 3) группа электронов с наиболее вероятной энергией  $E = 40-45$  eV исчезает из энергетического спектра. В этой области разряда в спектре наблюдаются только группы электронов с наиболее вероятной энергией  $E = 75-95$  eV. Из представленных зависимостей можно сделать вывод о том, что максимальную энергию anomalно быстрые элект-

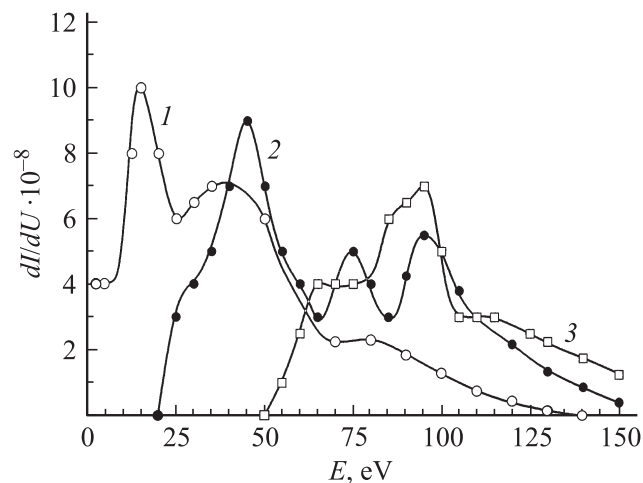


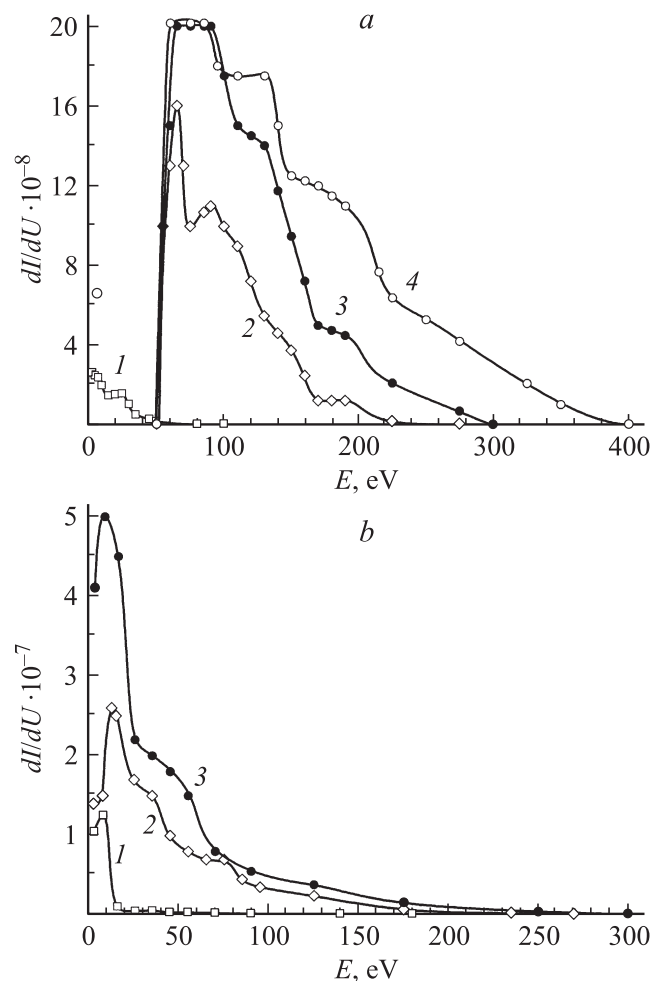
Рис. 1. Продольные энергетические спектры электронов на разных расстояниях от анода. Цилиндрические электроды,  $D = 80$  mm,  $L_a = 1.75D$ , рабочий газ — воздух,  $P = 3 \cdot 10^{-5}$  Torr,  $B = 0.06$  T,  $U_a = 1.5$  kV,  $\Delta U = 0$  V.

троны набирают в межэлектродном промежутке анод-внешний срез катода. Необходимо также отметить, что набор электронами дополнительной энергии в аксиальном направлении происходит за время, не превышающее время жизни anomalно быстрых электронов на силовых линиях магнитного поля перед энергоанализатором.

Обрезание энергетических спектров в низкоэнергетической области (рис. 1, кривые 2 и 3) указывает на существование потенциальных барьеров для электронов в области катодов. Наличие потенциальных барьеров приводит к тому, что группа anomalно быстрых электронов с наиболее вероятной энергией  $E = 40-45$  eV оказывается запертой в разряде. Величину потенциального барьера перед входной сеткой энергоанализатора можно оценить по потенциалу отсечки низкоэнергетической компоненты эжектируемого электронного пучка. В области бокового среза анода (кривая 1) потенциальный барьер для anomalно быстрых электронов отсутствует, поскольку в этой области в энергетических спектрах присутствуют электроны с энергиями вплоть до нулевых значений анализируемых энергий. В области внутреннего края цилиндрического катода (кривая 2) значение потенциального барьера составляет порядка  $-20$  eV. Из энергетического спектра в этом случае исчезают электроны с энергией, меньшей 20 eV. В области за цилиндрическим катодом (кривая 3) потенциальный барьер достигает  $-50$  eV, так как из спектра исчезают электроны с энергией, меньшей 50 eV. Таким образом, формирование энергетических спектров эжектируемого электронного пучка связано с его прохождением через потенциальные барьеры, которые возникают в области катодов самосогласованно.

## Влияние внешних параметров пеннинговского разряда на энергетические спектры anomalно быстрых электронов

Исследование энергетических спектров anomalно быстрых электронов на радиусе максимума плотности электронного тока за цилиндрическим катодом при различных анодных напряжениях показало, что при увеличении анодного напряжения энергетические спектры электронов расширяются в область больших энергий (рис. 2). Кроме основной группы электронов в спектрах наблюдаются ступенчатые структуры из менее выраженных подгрупп электронов. Данные особенности энергетических спектров характерны для всех систем разрядных электродов при различных внешних параметрах разряда. Энергетический интервал между подгруппами электронов возрастает при увеличении анодного напряжения. Механизм возникновения ступенчатых структур остается невыясненным. Одной из причин их



**Рис. 2.** Продольные энергетические спектры электронов при различных анодных напряжениях ( $I - U_a = 1, 2 - 1.5, 3 - 2, 4 - 2.5$  kV). *a*) рабочий газ — воздух, цилиндрические электроды,  $D = 80$  mm,  $L_a = 1.5D$ ,  $P = 3 \cdot 10^{-5}$  Torr,  $B = 0.06$  T,  $\Delta U = 0$  V; *b*) рабочий газ — водород, остальные параметры те же, что для (*a*).

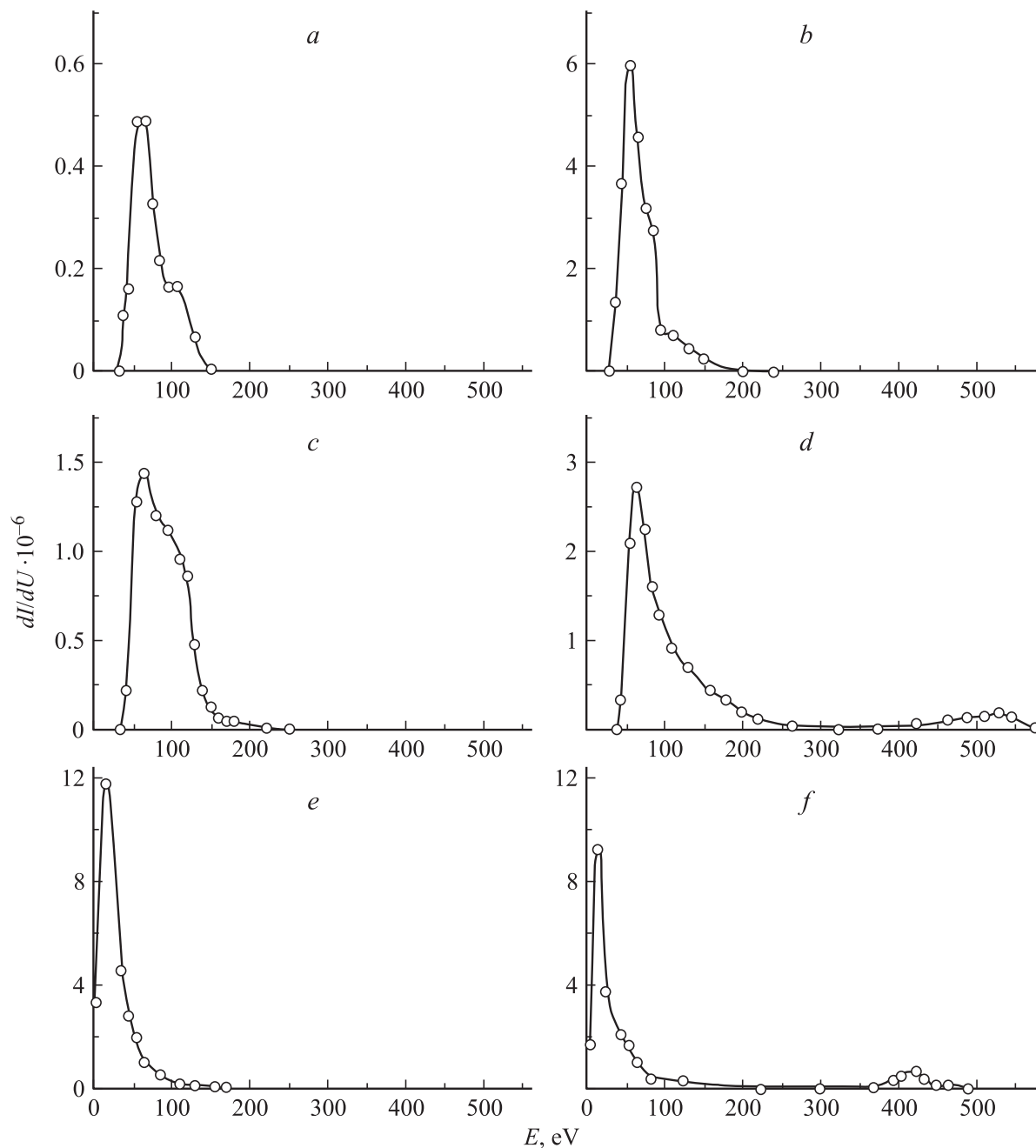
появления в энергетических спектрах может быть изменение наиболее вероятной энергии anomalно быстрых электронов при периодических выбросах электронов, обусловленных нестационарностью амплитуды колебаний отрицательного пространственного заряда и тока эжектируемого электронного пучка [2–4].

При использовании более легкого рабочего газа водорода наиболее вероятная энергия anomalно быстрых электронов имеет более низкие значения  $E = 5 - 20$  eV (рис. 2, *b*; 3, *e*), чем для воздуха  $E = 20 - 100$  eV (рис. 2, *a*; 3, *a, c*). Похожие зависимости наблюдаются для всех систем разрядных электродов. Анализ энергетических спектров указывает на то, что данные особенности, по-видимому, обусловлены более низкими потенциальными барьерами в области катодов в случае использования более легкого рабочего газа водорода.

В ходе экспериментов также было определено влияние электрической асимметрии между катодами на энергетические спектры эжектируемого электронного пучка. Как видно из рис. 3, при отрицательном смещении потенциала катода  $I$  ([1], рис. 1) наиболее вероятная энергия электронного пучка за цилиндрическим катодом  $3$  существенно не изменяется для всех конфигураций разрядных электродов. Однако сами энергетические спектры расширяются в область больших энергий. Расширение энергетических спектров связано с понижением потенциала плазмы в области эжекции электронного пучка [1]. О понижении потенциала плазмы в этом случае также свидетельствует уменьшение  $E$  с 200 до 110–150 eV наиболее вероятной энергии положительных ионов, которые поступают в энергоанализатор из центральной области пеннинговского разряда (рис. 4). Для систем разрядных электродов с плоским катодом (рис. 3, *d, f*) в энергетических спектрах появляется группа электронов с наиболее вероятной энергией, примерно соответствующей разности потенциалов между катодами. Появление данной группы электронов обусловлено вторичной электронной эмиссией с поверхности плоского катода.

## Обсуждение экспериментальных результатов

На основе анализа экспериментальных данных, полученных для систем разрядных электродов диаметром  $D = 80$  mm можно предположить, что одной из основных причин набора электронами дополнительной энергии в аксиальном направлении являются колебания глубины аксиальной потенциальной ямы для электронов. Данные колебания наблюдаются во время прохождения азимутальной неоднородности пространственного заряда анодного слоя через азимутальную область разряда, где в данный момент происходит выброс электронов. Дополнительную энергию получают те электроны, которые влетают в аксиальную потенциальную яму перед прохождением азимутальной неоднородности. При пролете таких электронов через центральную область разряда глубина аксиальной потенциальной ямы для



**Рис. 3.** Продольные энергетические спектры электронов при различных включениях отражательных катодов  $D = 18$  mm,  $P = 9 \cdot 10^{-5}$  Torr,  $U_a = 1.5$  kV,  $B = 0.08$  T; *a, b*) рабочий газ — воздух, цилиндрические электроды,  $\Delta U = 0-400$  V; *c, d*) рабочий газ — воздух, электроды с плоским катодом,  $\Delta U = 0-500$  V; *e, f*) рабочий газ — водород, электроды с плоским катодом,  $\Delta U = 0-400$  V.

электронов уменьшается из-за прохождения азимутальной неоднородности. Поэтому на выходе из аксиальной потенциальной ямы эти электроны приобретают дополнительную энергию, равную амплитуде колебания потенциала плазмы на дне аксиальной потенциальной ямы. При каждом последующем колебании потенциала плазмы энергия таких электронов продолжает возрастать дискретно. В пользу представленного механизма свидетельствует тот факт, что для электронов, осцил-

лирующих между катодами, время их пролета через разрядный промежуток по порядку величины близко к полупериоду наиболее интенсивных высокочастотных колебаний потенциала плазмы  $T/2 = 2 \cdot 10^{-8}$  s.

В рамках данной модели существование в энергетических спектрах ступенчатых структур из подгрупп электронов объясняется дискретным характером набора электронами дополнительной энергии. Увеличение энергетического интервала между ними при повышении

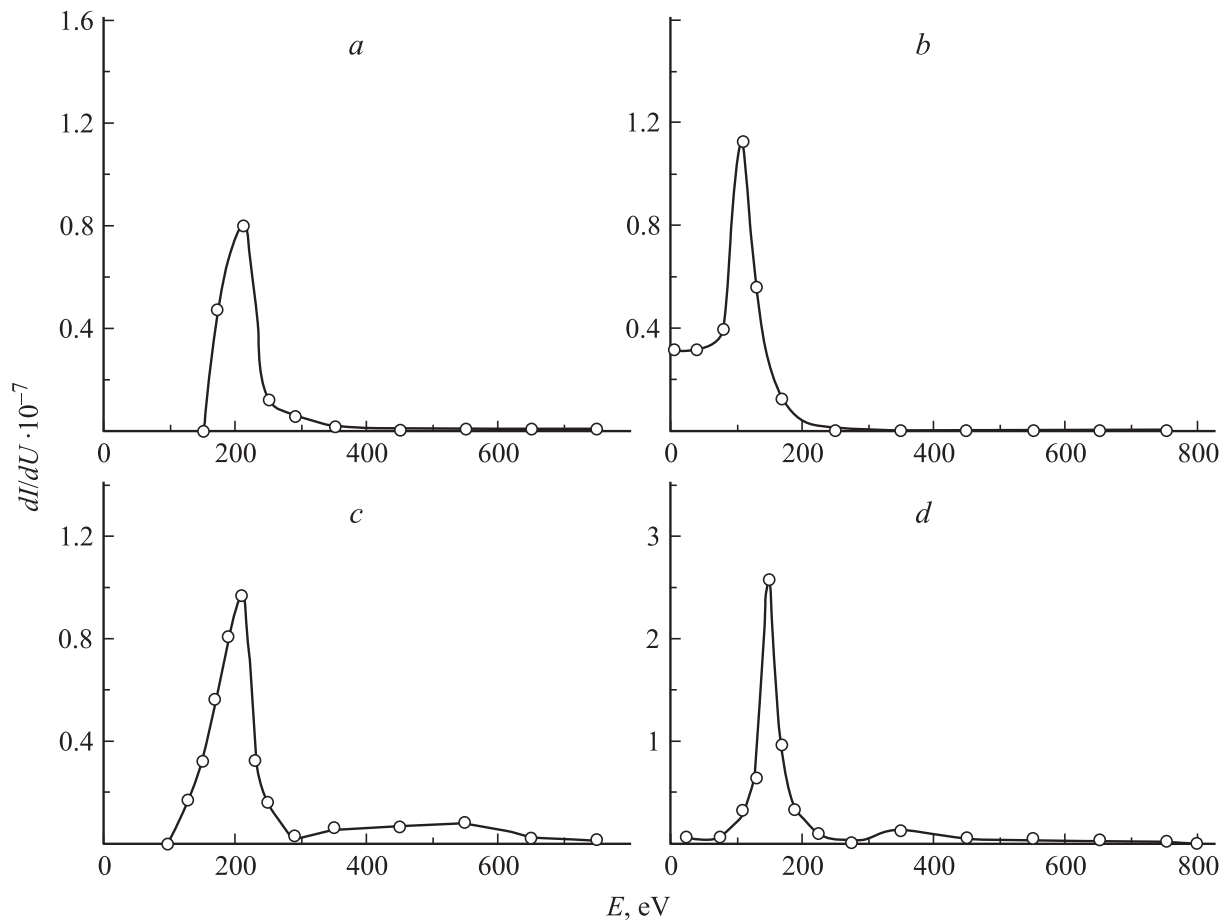


Рис. 4. Продольные энергетические спектры ионов. Параметры те же, что для рис. 3.

анодного напряжения может быть объяснено возрастанием амплитуды колебаний потенциала плазмы на дне аксиальной потенциальной ямы. Увеличение наиболее вероятной энергии электронного пучка в аксиальном направлении объясняется тем, что в наборе энергии участвуют электроны из периферийных аксиальных областей разряда. С ростом продольной энергии они осциллируют на большом удалении от анода.

## Заключение

В результате экспериментальных исследований установлены основные закономерности аксиальной эволюции усредненных во времени энергетических спектров anomalно быстрых электронов и предложена физическая модель, объясняющая процесс формирования их энергетических спектров в газоразрядных системах пеннинговского типа. Экспериментально показано, что набор anomalно быстрыми электронами дополнительной энергии происходит в аксиальном направлении и достигает максимальных значений в области отражательных катодов.

Экспериментально обнаружено и объяснено существование в энергетических спектрах эжектируемого

электронного пучка нескольких групп электронов с разной энергией. Первую, менее энергетичную группу, образуют электроны, запертые между потенциальными барьерами, которые возникают самосогласованно в области отражательных катодов. Вторая, более энергетичная группа, образована электронами, которые набирают в аксиальном направлении дополнительную энергию, достаточную для преодоления этих потенциальных барьеров. В энергетических спектрах также обнаружены подгруппы электронов, энергетические интервалы между которыми возрастают при увеличении анодного напряжения.

Определено влияние геометрии разрядных электродов, электрической асимметрии между катодами, а также массового числа рабочего газа на энергетические спектры эжектируемого электронного пучка. Показано, что для систем разрядных электродов с плоским катодом в энергетических спектрах пучка наблюдается группа электронов, которые эмитируются из поверхности плоского катода. При использовании более легкого рабочего газа водорода наиболее вероятная энергия эжектируемого электронного пучка имеет более низкие значения 5–20 eV, чем для воздуха,  $E = 20–100$  eV. Отрицательное смещение потенциала одного из катодов

приводит к расширению энергетического спектра аномально быстрых электронов, эжектируемых со стороны противоположного катода. При этом наиболее вероятная энергия электронов изменяется несущественно.

## Список литературы

- [1] *Бориско В.Н., Петрушени А.А.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 1. С. 86–90.
- [2] *Кервалишвили Н.А.* // Физика плазмы. 1989. Т. 15. Вып. 3. С. 359–361.
- [3] *Кервалишвили Н.А.* // Физика плазмы. 1989. Т. 15. Вып. 6. С. 753–755.
- [4] *Кервалишвили Н.А.* ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 2. С. 78–84.
- [5] *Hirsh E.H.* // Brit. J. Appl. Phys. 1964. Vol. 15. P. 909–916.
- [6] *Баберцяи Р.П., Бадалян Э.С., Егиазарян Г.А., Тер-Геворкян Э.И.* // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 12. С. 2382–2383.
- [7] *Баберцяи Р.П., Бадалян Э.С., Егиазарян Г.А., Тер-Геворкян Э.И.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 10. С. 43–46.
- [8] *Бархударов Э.М., Кервалишвили Н.А., Кортхонджия В.П.* // ЖТФ. 1972. Т. 42. Вып. 9. С. 1904–1908.
- [9] *Кервалишвили Н.А.* // Физика плазмы. 1989. Т. 15. Вып. 2. С. 174–181.