

УДК 539.182

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ ПО ПОВЕРХНОСТИ КАТОДОВ ПЕННИНГОВСКОЙ ТРУБКИ

Г.А. ЕГИАЗАРЯН, Ж.Б. ХАЧАТРЯН, Э.С. БАДАЛЯН,
Э.И. ТЕР-ГЕВОРКЯН, В.Н. ОГАНЕСЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 17 июля 2005 г.)

Экспериментально исследованы условия формирования продольных потоков электронов в разряде типа Пеннинга. Получены зависимости плотности токов продольных электронов от длины разрядного промежутка на отдельных радиальных участках катода. Представлены радиальные распределения плотности продольных электронных токов по поверхности катодов, в различных условиях динамического режима разряда. Плотность продольных токов в зависимости от условий разряда достигает максимального значения как на центральной, так и на других областях поверхности катода.

В плазменных источниках извлечение электронов в большинстве случаев осуществляется с помощью вытягивающих полей. Однако, в разряде типа Пеннинга, в условиях, когда присутствуют высокочастотные колебания, вместе с уходом дополнительного количества электронов на анод одновременно на катоды самостоятельно попадает значительное количество электронов. Измерение значений энергии электронов, выходящих через центральное отверстие одного из катодов, показывает наличие электронов с аномально большими энергиями [1-5]. В этих работах изучены условия возникновения только осевых (центральных) электронных потоков. Между тем эксперименты показывают, что электроны попадают и на другие области катодов. В настоящей работе исследуются особенности распределения продольных потоков электронов по всей поверхности катода.

Схема разрядной камеры приведена на рис.1. Она помещена в однородном магнитном поле соленоида и представлена цилиндрическим анодом 1, подвижным 2 и неподвижным 3 молибденовыми катодами по обеим сторонам анода. На неподвижном катоде сделана радиальная щель, которая закрывается плотно прижимающейся подвижной полоской, имеющей отверстие диаметром 3 мм. Она перемещается с помощью специального устройства и пропускает через отверстие поток электронов и ионов, попадающих на различные радиальные участки катода. К неподвижному катоду примыкает коллектор 4, внутри которого располагаются сетки 5 и 6. На сетку 5 подается отрицательный потенциал и методом задерживающего потенциала измеряется энергия электронов, а также разделяются электронные и ионные составляющие продольного тока на катод. Чтобы предотвратить возникновение поля сетки 5 в разрядный промежуток, установлена вторая сетка 6. Продольные

токи измеряются электродом 7. Охранный цилиндр 8 находится под потенциалом катодов.

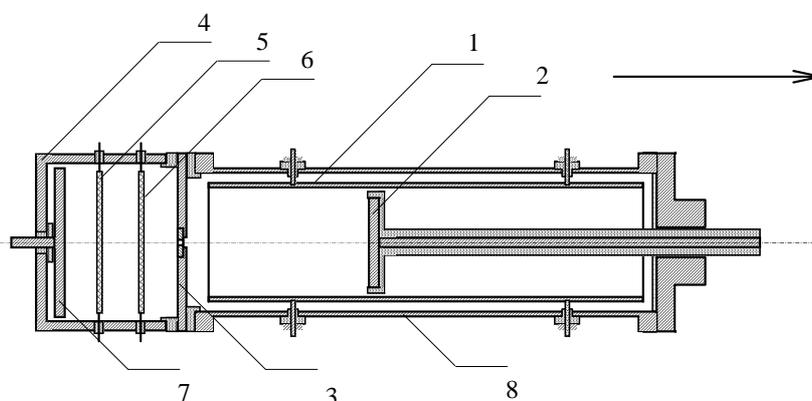


Рис.1. Схема разрядной камеры. 1 – анод; 2 – подвижный катод; 3 – неподвижный катод; 4 – коллектор; 5,6 – сетки; 7 – электрод; 8 – охранный цилиндр.

На рис.2а-г представлены зависимости плотности электронного тока j_e от длины разрядного промежутка ℓ_a . Параметрами являются анодное напряжение U_a , магнитная индукция B и давление остаточного газа P . Электронные потоки на катоды очень чувствительны к изменениям значений внешних параметров разряда, особенно, к изменениям длины анода ℓ_a . На всех радиальных участках катода ($r = 0 \div 12$ мм), куда попадают электроны, кривые зависимости плотности тока $j_e(\ell_a)$ имеют по одному резко выраженному максимуму, которые возникают в случае коротких анодов ($\ell_a = 2.5 \div 3.5$ см).

Механизмы образования и направления на катоды электронов и ионов существенно отличаются. Контрольные измерения показывают, что в условиях попадания больших потоков электронов на различные участки катодов, стационарный разрядный ток переходит в переменный и в разряде присутствуют диокотронные колебания [2-4]. Анализ зависимостей основных характеристик, а также ВЧ-спектрограмм разряда показывает, что полученные результаты соответствуют условиям динамического режима горения разряда и появление больших потоков электронов на различные, в том числе и дальние участки катодов связано с "выталкиванием" электронов из неустойчивого прианодного электронного слоя большой концентрации. С внутренней поверхности слоя электроны выбрасываются в сторону оси разряда и по силовым линиям магнитного поля направляются к катодам. Одновременно с торцов выжимаемого слоя также образуется электронный поток, идущий непосредственно к катодам. Именно эти процессы обеспечивают образование и попадание большого электронного потока не только на центральные, но и на другие области поверхности катода.

Источниками продольных потоков электронов являются: 1) электроны, выброшенные из внутренней поверхности неустойчивого слоя, 2) электроны, выжимаемые от торцов электронного слоя, 3) сгустки продольно осциллирующих приосевых электронов, модулированные переменным радиальным полем, 4) u -электроны (электроны, эмитированные из поверхности катодов при бомбардировке их положительными ионами).

При $\ell_a > 4.5$ см отсутствуют первые три причины возникновения продольного потока и электронный ток на катод ничтожно мал. При длинных анодах, в условиях отсутствия неустойчивого электронного слоя радиальная ионизация существенно ослаблена и роль продольной ионизации, не зависящей от B , растет. Небольшое количество электронов, попадающих только на центральные участки катодов ($r = 0-6$ мм), является следствием усиления u -процессов из-за увеличения продольной, в основном, приосевой ионизации (рис.2а-г).

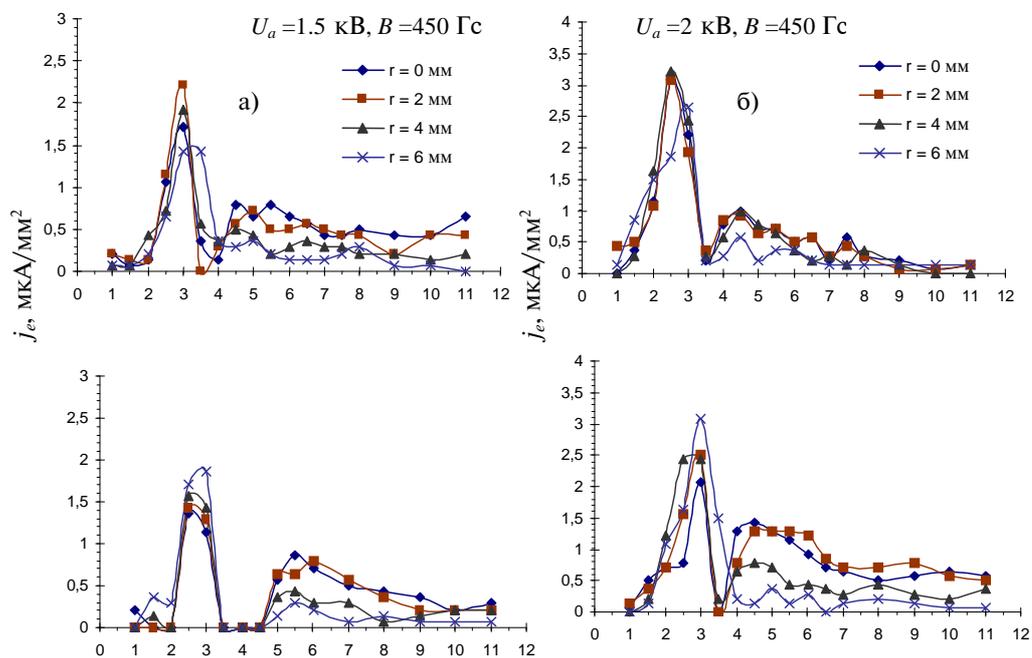
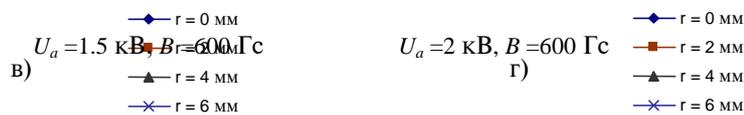


Рис.2. Зависимости плотности продольного электронного тока j_e от длины разрядного



промежутка ℓ_a . Рабочий газ – воздух. $P=5 \cdot 10^{-5}$ Торр, а) $U_a=1.5$ кВ, $B=450$ Гс; б) $U_a=2$ кВ, $B=450$ Гс; в) $U_a=1.5$ кВ, $B=600$ Гс; г) $U_a=2$ кВ, $B=600$ Гс.

ℓ_a , см
150

Электронный поток может иметь значительное сечение и попадать на большую часть поверхности катода. Также возможны условия, когда максимальный электронный поток попадает не на центр катода, а на другие, даже далекие радиальные участки его поверхности (рис.3а-г). Здесь представлены кривые распределения токов электронных потоков по поверхности катода $j_e(r)$ только для коротких анодов, поскольку в длинных разрядных промежутках ($\ell_a > 4,5$ см) электронный поток на катод незначительный. В условиях $\ell_a > 4,5$ см диокотронная неустойчивость отсутствует и поток электронов на центральные участки катода обусловлен начальными скоростями y -электронов. Об этом свидетельствует и слабая зависимость j_e от B и ℓ_a , а также полное отсутствие таких электронов на периферии катода ($r > 8$ мм) (рис.3а-г). Видно, что при коротких анодах значительные электронные потоки могут попадать как на центральные ($0 < r < 4$ мм), так и на средние ($4 < r < 10$ мм) области поверхности катода. Более того, в некоторых режимах максимальный электронный поток попадает не на центральные, а на средние радиальные участки. На периферийные участки ($r > 12$ мм) электроны практически не попадают.

На рис.3б,в видно, что центральный электронный поток на катод достаточно равномерно распределен по r или может занимать большую площадь катода. При $U_a = 2$ кВ, $B = 450$ Гс плотность электронного тока достигает максимума $j_{e,max} \approx 3,1$ мкА/мм² на центральной области катода $0 < r < 4$ мм при длине анода $\ell_a = 2,5$ см, а при тех же значениях U_a и B $j_{e,max} \approx 2,1$ мкА/мм² на средней радиальной области $r = 10$ мм, при $\ell_a = 3,5$ см. В условиях $U_a = 2$ кВ, $B = 600$ Гс максимальная плотность электронного тока ($j_{e,max}(3,1$ мкА/мм²) достигается на радиальных участках $r = 6$ и 8 мм при длинах анода $\ell_a = 3$ и $3,5$ см.

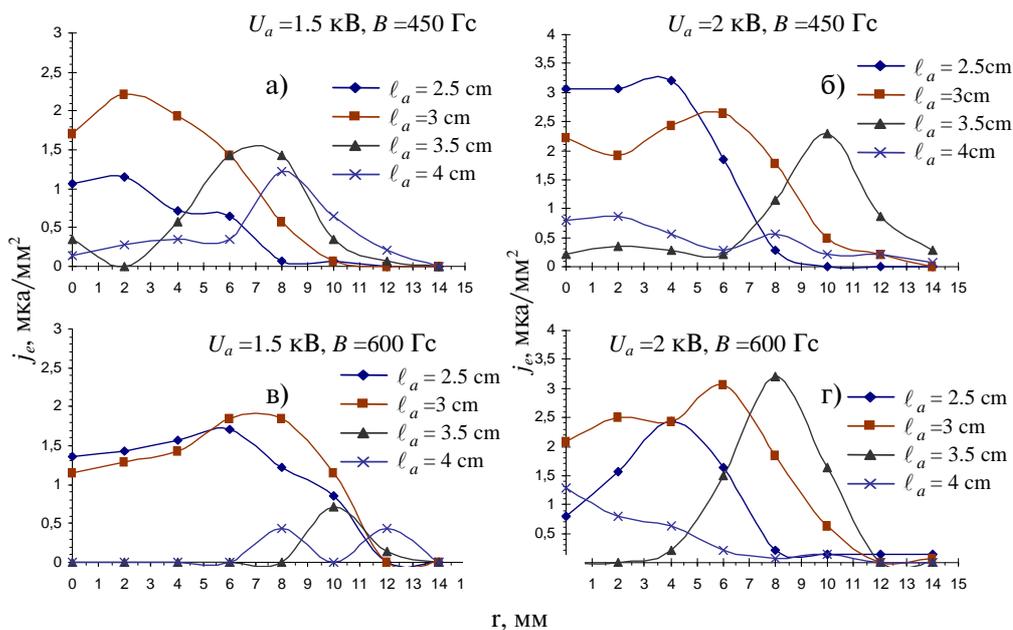


Рис.3. Зависимости плотности продольного электронного тока j_e от расстояния до центра катода r . Рабочий газ – воздух. $P = 5(10^{-5}$ Торр, а) $U_a = 1,5$ кВ, $B = 450$ Гс; б) $U_a = 2$ кВ, $B = 450$ Гс; в) $U_a = 1,5$ кВ, $B = 600$ Гс; г) $U_a = 2$ кВ, $B = 600$ Гс.

Увеличение U_a сопровождается ростом j_e на всех радиальных участках. Однако при увеличении магнитной индукции от 450 до 600 Гс на центральных участках катода ($r = 0 \div 4$ мм) электронные потоки уменьшаются, а на средних участках, наоборот, растут (рис.2,3). Во втором режиме разряда с ростом B электронное облако сжимается, плотность замагниченного заряда в нем растет. В результате, несмотря на уменьшение общей ионизации (разрядного тока), количество и скорость "выброшенных" из неустойчивого слоя электронов на отдельные радиальные участки катодов не только не уменьшается, но и растет. Из кривых рис.2,3 видно, что растет и сумма токов всех радиальных участков, т.е. полный электронный ток $I_{e.tot.}$. Значительно обогащенные спектрограммы ВЧ-колебаний также подтверждают, что в этих условиях плотность электронного слоя растет.

При $B = 450$ Гс, $U_a = 2$ кВ полный поток электронов на всю радиальную полосу катода равен $I_{e.tot.} = 82$ мкА, причем больше половины электронного потока попадает на центральную часть катода. При $B = 600$ Гс на центральной области катода достигает меньшее, а на средние участки большее количество электронов. В этих условиях регистрируется максимальный поток электронов на всю радиальную полосу: $I_{e.tot.} = 88$ мкА.

Полный электронный поток на всю радиальную полосу катода, а также большинство электронных потоков, попадающих на его отдельные радиальные участки, принимают наибольшие значения в условиях $\ell_a = 2.5 \div 3.5$ см. За этим интервалом полные электронные потоки незначительны. Эти результаты объясняются вышеизложенным механизмом формирования и попадания на катоды интенсивных электронных потоков. При изменении длины анода от 3 до 4 см прианодные радиальное электрическое поле E_r и концентрация электронов n_e уменьшаются, интенсивность диокотронной неустойчивости падает, электронные выбросы в сторону оси и к катодам ослабляются, полный электронный ток резко уменьшается. В итоге большинство электронов не достигает оси разряда и попадает на средние радиальные участки катода (рис.3). Об этом свидетельствуют и спектрограммы ВЧ-колебаний, снятые с разрядного тока: при $\ell_a = 3$ см спектр ВЧ-колебаний резко обогащается, амплитуды растут. В условиях же $\ell_a > 4$ см этот спектр полностью исчезает.

Электронный поток на всю радиальную полосу существенно зависит от U_a : увеличение анодного напряжения от 1.5 до 2 кВ (в 1.25 раза) сопровождается ростом $I_{e.tot.}$ от 55 до 90 мкА (в 1.6 раза). С ростом U_a общая ионизация и удержанный магнитным полем электронный пространственный заряд растут. Соответственно растет и $I_{e.tot.}$, поскольку источником основной части продольных электронов является замагниченный электронный слой. С ростом же магнитной индукции B , как отмечено выше для электронных потоков на отдельные радиальные участки катода, полный электронный ток на катод также несколько растет.

Таким образом, экспериментально исследовано распределение плотности продольного электронного потока на катоды пеннинговской трубки. Получены кривые $j_e(r)$ для различных условий динамического режима разряда. Показано, что пучки продольных потоков могут быть как узкими, так и иметь достаточно большие сечения. Интенсивные электронные потоки возникают только в коротких трубках и могут попадать как на центральные, так и на другие области катодов. Полученные результаты подтверждают предложенный нами механизм возникновения, формирования и попадания продольных

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ю.Е.Крейндель.** Плазменные источники электронов. М., Атомиздат, 1977.
2. **Р.П.Баберцян, Э.С.Бадалян, Г.А.Егиазарян, Э.И.Тер-Геворкян.** Изв. НАН Армении, Физика, **34**, 183 (1999).
3. **G.A.Egiazaryan, E.S.Badalyan, E.I.Ter-Gevorgyan, V.N.Hovhannisyan.** Proc. XIII Inter. Conf. on Gas Discharges and their Applications, Glasgow, 2000, vol.2, p.671.
4. **Г.А.Егиазарян, Ж.Б.Хачатрян, Э.С.Бадалян, Э.И.Тер-Геворкян, В.Н.Оганесян.** Изв. НАН Армении, Физика, **36**, 44 (2001).
5. **В.Н.Бориско, А.А.Петрушеня.** ЖТФ, **73**, 86 (2003).

ՊԵՆՆԻՆԳՅԱՆ ԽՈՂՈՎԱԿԻ ԿԱՏՈՂՆԵՐԻ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ՎՐԱ ԵՐԿԱՅՆԱԿԱՆ
ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ՀՈՍՔԵՐԻ ԲԱՇԽՈՒՄԸ

Գ.Ա. ԵՂԻԱԶԱՐՅԱՆ, Ժ.Բ. ԽԱԶԱՏՐՅԱՆ, Է.Ս. ԲԱԴԱԼՅԱՆ,
Է.Ի. ՏԵՐ-ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ, Վ.Ն. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ

Փորձարարական եղանակով հետազոտված են Պեննինգի տիպի պարպման մեջ երկայնական էլեկտրոնային հոսքերի ձևավորման պայմանները: Ստացված են երկայնական էլեկտրոնային հոսքերի խտության կախվածությունները պարպումային միջակայքի երկարությունից կատոդի առանձին շառավղային տեղամասերի վրա: Ներկայացված են կատոդի մակերևույթով երկայնական էլեկտրոնային հոսանքների խտությունների շառավղային բաշխումները պարպման դինամիկ ռեժիմի տարբեր պայմաններում: Երկայնական հոսանքների խտությունը պարպման պայմաններից կախված հասնում է առավելագույն արժեքի ինչպես կատոդի կենտրոնական, այնպես էլ նրա մակերևույթի այլ տեղամասերի վրա:

DISTRIBUTION OF LONGITUDINAL ELECTRON FLOWS
ON THE SURFACE OF PENNING TUBE CATHODES

G.A. EGIAZARYAN, ZH.B. KHACHATRIAN, E.S. BADALYAN,
E.I. TER-GEVORGYAN, V.N. HOVHANNISYAN

Conditions of formation of longitudinal electron flows in a discharge of the Penning type are studied experimentally. Dependences of the current density of longitudinal electrons on the length of a discharge gap for separate radial sections of the cathode are obtained. Radial distributions of the density of longitudinal electron currents on the surface of cathodes, under various conditions of the dynamic regime of the discharge, are presented. The density of longitudinal currents depending on the discharge conditions attains a peak value both on the central and other areas of the cathode surface.