

04;10;12

О распределении электронных потоков по поверхности катода в разряде с осциллирующими электронами

© Г.А. Егиазарян, Ж.Б. Хачатрян, Э.С. Бадалян, Э.И. Тер-Геворкян, В.Н. Оганесян

Ереванский государственный университет,
375049 Ереван, Армения
e-mail: vao@ysu.am, vhovhan@server.physdep.r.am

(Поступило в Редакцию 7 июня 2005 г.)

Экспериментально исследован механизм процессов, обуславливающих распределение продольных электронных потоков по поверхности катода в разряде с осциллирующими электронами. Изучено влияние длины разрядного промежутка на величину и распределение электронных потоков. Показано, что интенсивный поток продольных электронов для трубки диаметра $d_a = 31$ mm формируется только в коротких анодах — $l_a = 2.5–3.5$ cm. Получено распределение электронных потоков по поверхности катода в различных условиях разряда.

PACS: 52.80.Tn

Введение

В плазменных источниках извлечение электронов в большинстве случаев осуществляется за счет вытягивающих полей. Однако в разряде с осциллирующими электронами при определенных условиях на катоды самостоятельно попадает большое количество электронов [1–5]. В работах [2–4] изучен механизм формирования и условия попадания электронов на катоды пеннинговского разряда и выхода потока продольных электронов через центральное отверстие катода.

Данная статья является продолжением работ [2–4,6] и посвящена изучению распределения электронных потоков по поверхности катода пеннинговской трубки.

Методика измерений

Особенностью методики производимых исследований является совместное измерение многих характеристик разряда (I_p — разрядный ток, ионные I_i и электронные токи I_e , спектр высокочастотных колебаний), что облегчает анализ и интерпретацию полученных результатов. Схема разрядной камеры приведена на рис. 1, *a*. 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 (рис. 1, *b*), имеющей отверстие диаметром $\varnothing = 3$ mm. 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, 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 проникновение поля сетки 5 в разрядный промежуток, установлена вторая сетка 6. Продольные токи измеряются электродом 7. Охранный цилиндр 8 находится под потенциалом катодов.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2, 3 представлены результаты измерений токов от длины анодного цилиндра l_a (диаметр $d_a = 31$ mm): $I_p(l_a)$, $I_i(l_a)$, $I_e(l_a)$. В коротких разрядных промежутках радиальное падение потенциала больше и с ростом l_a интенсивная радиальная ионизация сопровождается ростом замагниченного электронного пространства заряда. Последнее в свою очередь приводит к еще большему увеличению радиального падения потенциала. В результате разрядные и ионные токи с ростом l_a быстро растут и достигают максимума (рис. 2 и 3). Как видно, для данного анодного напряжения U_a разрядный ток I_p достигает максимума при определенной длине l_a , значение которой не зависит от магнитной индукции B : при $U_a = 1.5$ kV $I_{p, \max.} = 1500 \mu\text{A}$ ($l_a = 4$ cm); при $U_a = 2$ kV $I_{p, \max.} = 2750 \mu\text{A}$ ($l_a = 3.5$ cm). Следовательно, оптимальное соотношение среднего радиального (\bar{E}_r) и продольного (\bar{E}_z) электрических полей внутри трубки, для достижения $I_{p, \max.}$, определяется отношением l_a/d_a . Причем с увеличением U_a радиальное падение потенциала растет быстрее, чем продольное, и оптимальное соотношение \bar{E}_r/\bar{E}_z наступает раньше при меньшей l_a . Об этом свидетельствует и то, что рост U_a всего на 500 V в связи с большим ростом интенсивности радиальной и общей ионизации приводит к увеличению I_p почти в два раза (рис. 2, 3).

При $l_a > l_{a, \text{opt.}}$ нарушается оптимальное соотношение \bar{E}_r/\bar{E}_z : существенное уменьшение интенсивности радиальной ионизации из-за ослабления \bar{E}_r не компенсируется небольшим увеличением продольной ионизации

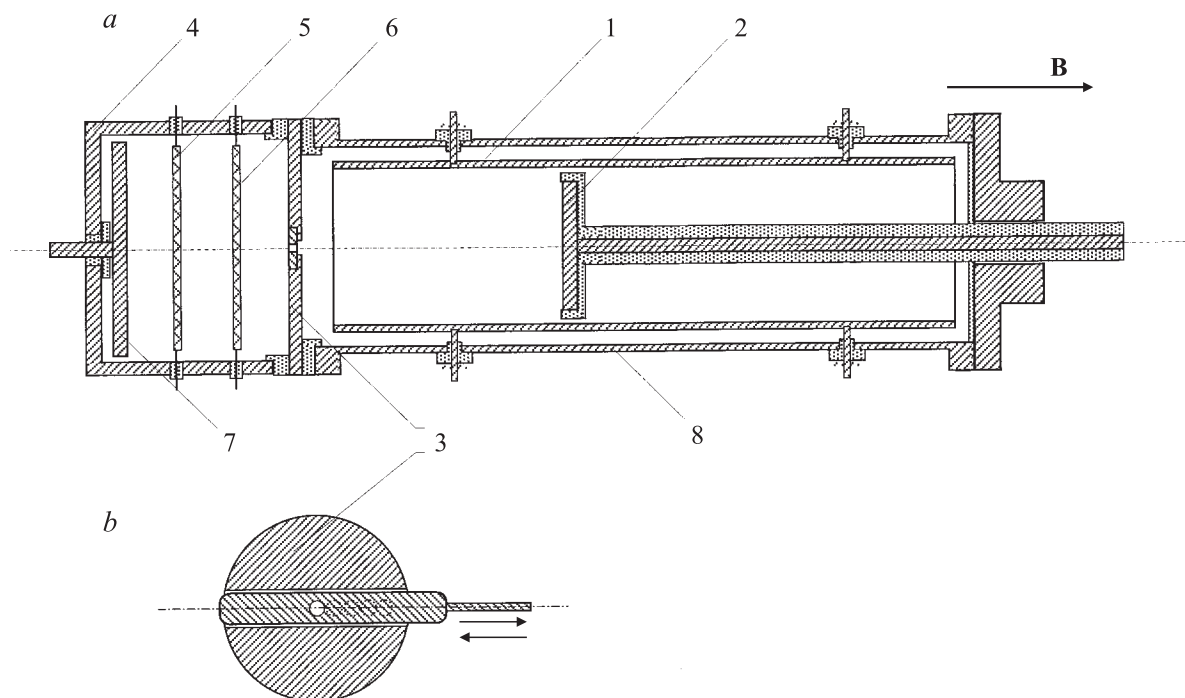


Рис. 1. Схема разрядной камеры.

из-за роста \bar{E}_z . В итоге после пика разрядный ток I_p резко падает (рис. 2,3). При этом значительно изменяется спектр ВЧ-колебаний. В дальнейшем с ростом l_a интенсивность радиальной ионизации ослабевает, разрядный ток уменьшается. В длинных анодах основное продольное падение происходит вблизи катодов (вдоль большей части анодного цилиндра — безградиентная область) [6].

С увеличением магнитной индукции от 450 до 600 Gs I_p уменьшается (рис. 2,3). Используемые значения магнитной индукции $B = 450$ и 600 Gs лежат на спаде кривой $I_p(B)$, т. е. когда разряд находится во II режиме: с увеличением B уменьшаются высота циклоиды и набранная на ней электроном энергия. Поэтому радиальная ионизация ослабляется и I_p падает.

При коротких анодах \bar{E}_r больше и влияние B значительно: кривые $I_p(l_a)$ и их пики существенно отличаются (рис. 2,3). При длинных анодах ($l_a \geq 8$ см) значения I_p при $B = 450$ и 600 Gs практически совпадают (существенна продольная ионизация): $I_p \approx 400 \mu\text{A}$ при $U_a = 2 \text{ kV}$ и $I_p \approx 200 \mu\text{A}$ при $U_a = 1.5 \text{ kV}$.

Ионные токи $I_i(l_a)$ быстро растут на всех радиальных участках, причем на центральных участках ($r = 0; 2 \text{ mm}$) рост I_i продолжается до несколько большего значения l_a , в отличие от остальных участков поверхности катода ($r > 4 \text{ mm}$) (рис. 2,3). На всех радиальных участках катода ионные токи $I_i(l_a)$ достигают своих максимальных значений одновременно с ходом I_p при одной и той же длине анода $l_a = 4$ см, при $U_a = 1.5 \text{ kV}$ или $l_a = 3.5$ см, при $U_a = 2 \text{ kV}$.

Максимальный ионный поток попадает на центральный участок катода. После достижения максимумов ход $I_i(l_a)$ на отдельных радиальных участках катодов отличается еще больше. Центральный ионный ток с ростом l_a уменьшается и при определенном значении l_a начинает снова расти (рис. 2,3). Последнее можно объяснить усилением относительной роли продольной ионизации в приосевых областях разряда.

На средних участках катодов ($4 < r < 10 \text{ mm}$) ионные токи от l_a монотонно спадают и в целом полный ионный ток по всей поверхности катода также медленно уменьшается.

При длинах анодов $l_a \geq 4.5 \text{ cm}$ на радиальные участки, далекие от центра катода $r > 6 \text{ mm}$, ионный поток практически не попадает из-за усиления фокусирующего действия разрядной камеры [6]. Ионный ток на периферии катода достигает своего максимального значения, когда I_p максимальный, следовательно, в этих условиях прианодная ионизация достаточно интенсивна, поскольку только из этой области ионы могут достичь периферии катода.

Влияние магнитного поля на ионные потоки сводится к изменению радиального распределения областей интенсивной ионизации. Так, увеличение магнитной индукции приводит к большему сжатию электронного пространственного заряда в сторону оси, и область интенсивной ионизации перемещается в сторону оси. При $U_a = 1.5 \text{ kV}$ магнитное сжатие сильнее, и оно сопровождается некоторым увеличением продольной ионизации в приосевых областях разряда. Поэтому, несмотря на уменьшение I_p с ростом B от 450 до

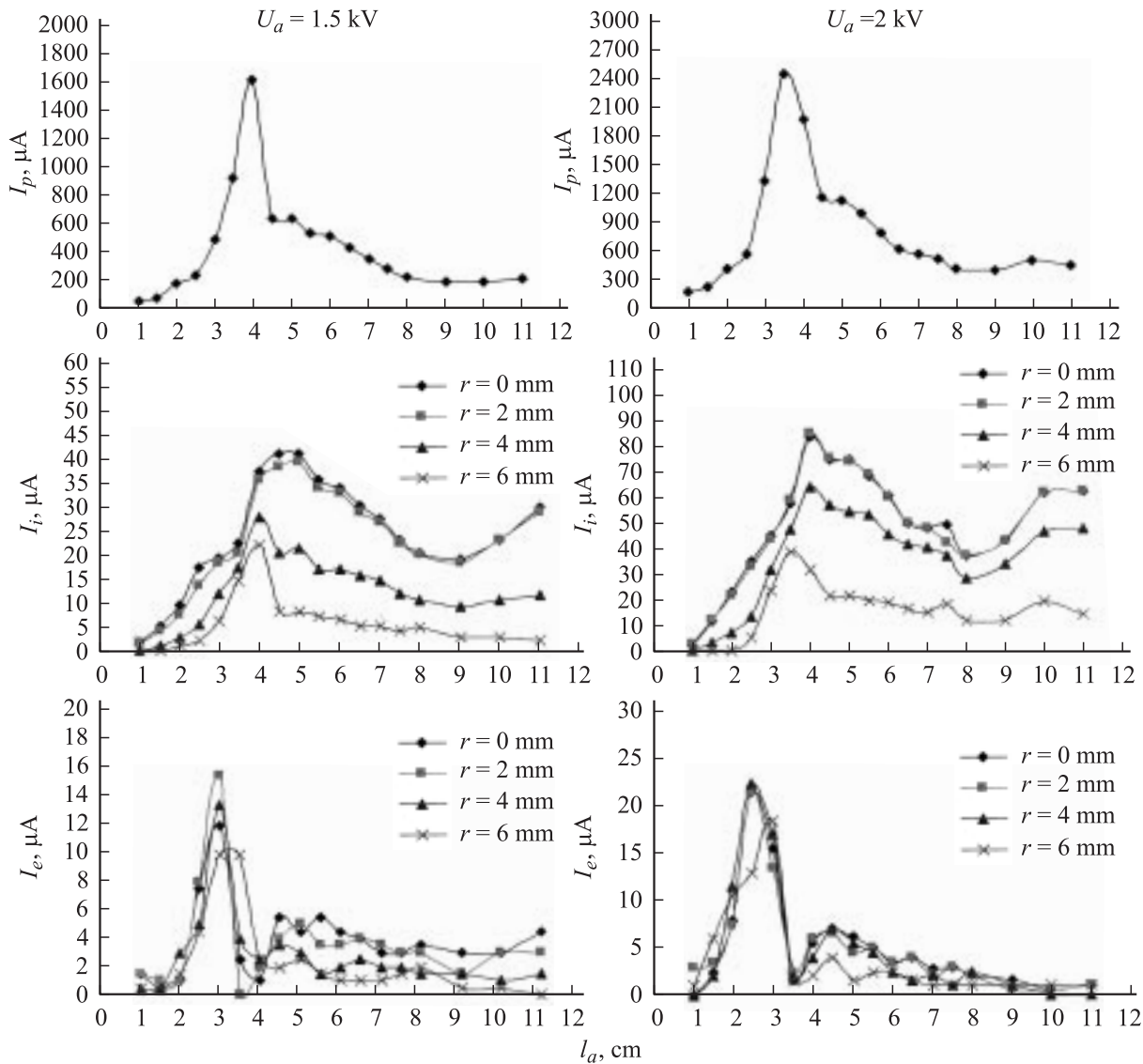


Рис. 2. Зависимости разрядного I_p , ионного I_i и электронного I_e токов от длины разрядного промежутка l_a . Рабочий газ — воздух. $P = 5 \cdot 10^{-5}$ Торр, $B = 450$ Gs.

600 Gs, на центральные области катода ионный поток не уменьшается. При $U_a = 2$ kV магнитное сжатие слабее, и поэтому на центральных участках катода с ростом индукции B ионные потоки уменьшаются параллельно с уменьшением I_p (рис. 2,3).

Электронные потоки на катоды I_e более чувствительны к изменениям значений внешних параметров разряда, особенно к изменениям длины анода l_a (рис. 2,3). На всех радиальных участках катода, куда попадают электроны ($r = 0-12$ mm) кривые $I_e(l_a)$ имеют по одному резко выраженному максимуму, которые возникают в случае коротких анодов ($l_a = 2.5-3.5$ cm). Как видно, максимумы $I_e(l_a)$ на отдельных радиальных участках катода и $I_p(l_a)$ не совпадают: электронные токи достигают своего максимума несколько раньше, при меньших длинах анода. Максимумы полного электронного потока на катод и разрядного тока также не совпадают

(рис. 2, 3, 5). Следовательно, с ростом l_a сначала наступает максимум интенсивности радиальной, затем общей ионизации.

Механизмы образования и направления на катоды электронов и ионов совершенно 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 связаны с „выталкиванием“ электронов из неустойчивого прианодного электронного слоя большой концентрации. С внутренней поверхности

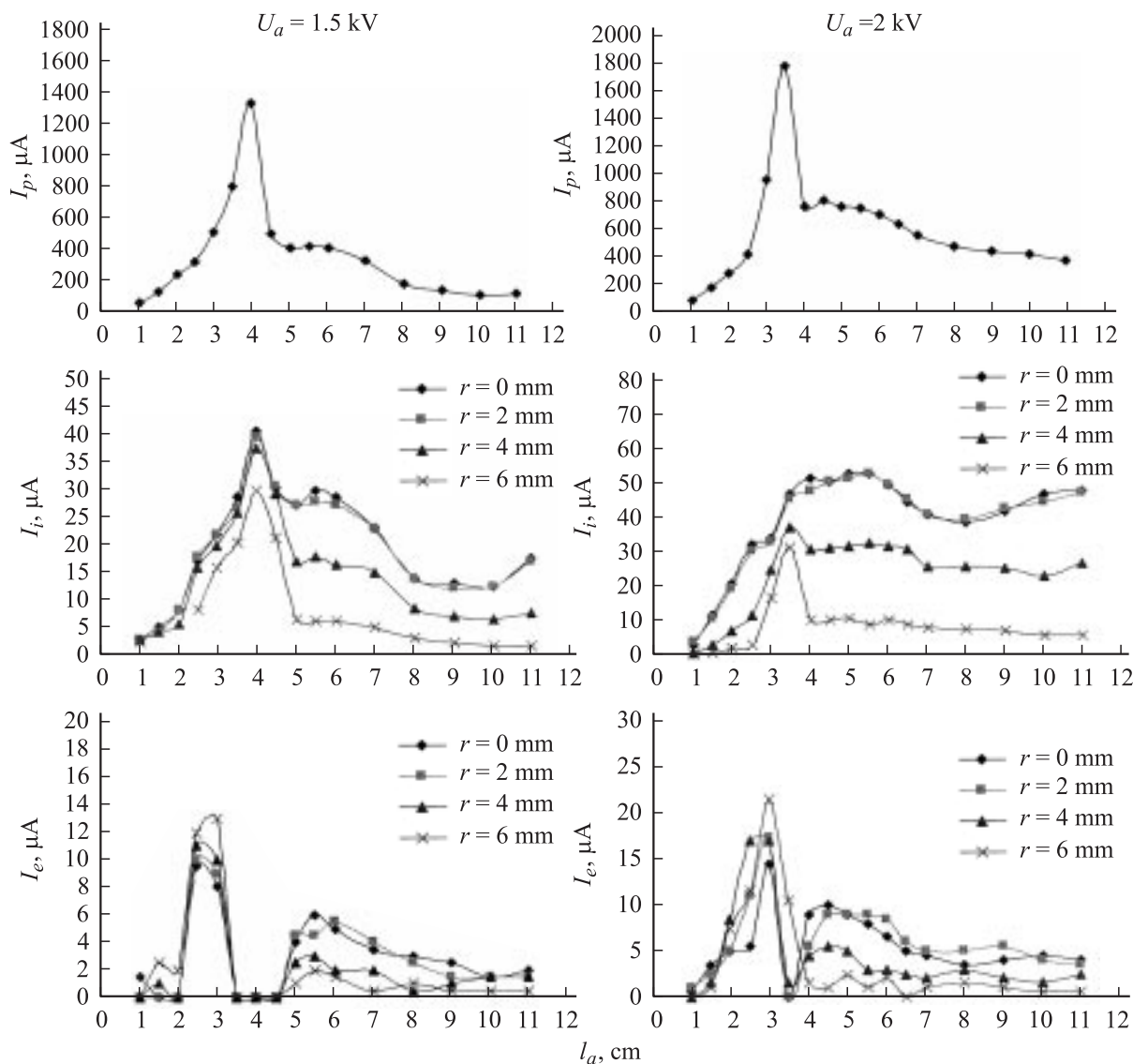


Рис. 3. Зависимости разрядного I_p , ионного I_i и электронного I_e токов от длины разрядного промежутка l_a . Рабочий газ — воздух. $P = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Torr}$, $B = 600 \text{ Gs}$.

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 этот механизм обеспечивает 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) γ -электроны.

При $l_a > 4.5 \text{ cm}$ 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 ($r = 0-6 \text{ mm}$), является следствием усиления γ -процессов из-за увеличения продольной в основном приосевой ионизации (рис. 2, 3).

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. 4). Здесь представлены кривые распределения токов электронных потоков по поверхности катода $I_e(r)$ только для коротких анодов, поскольку

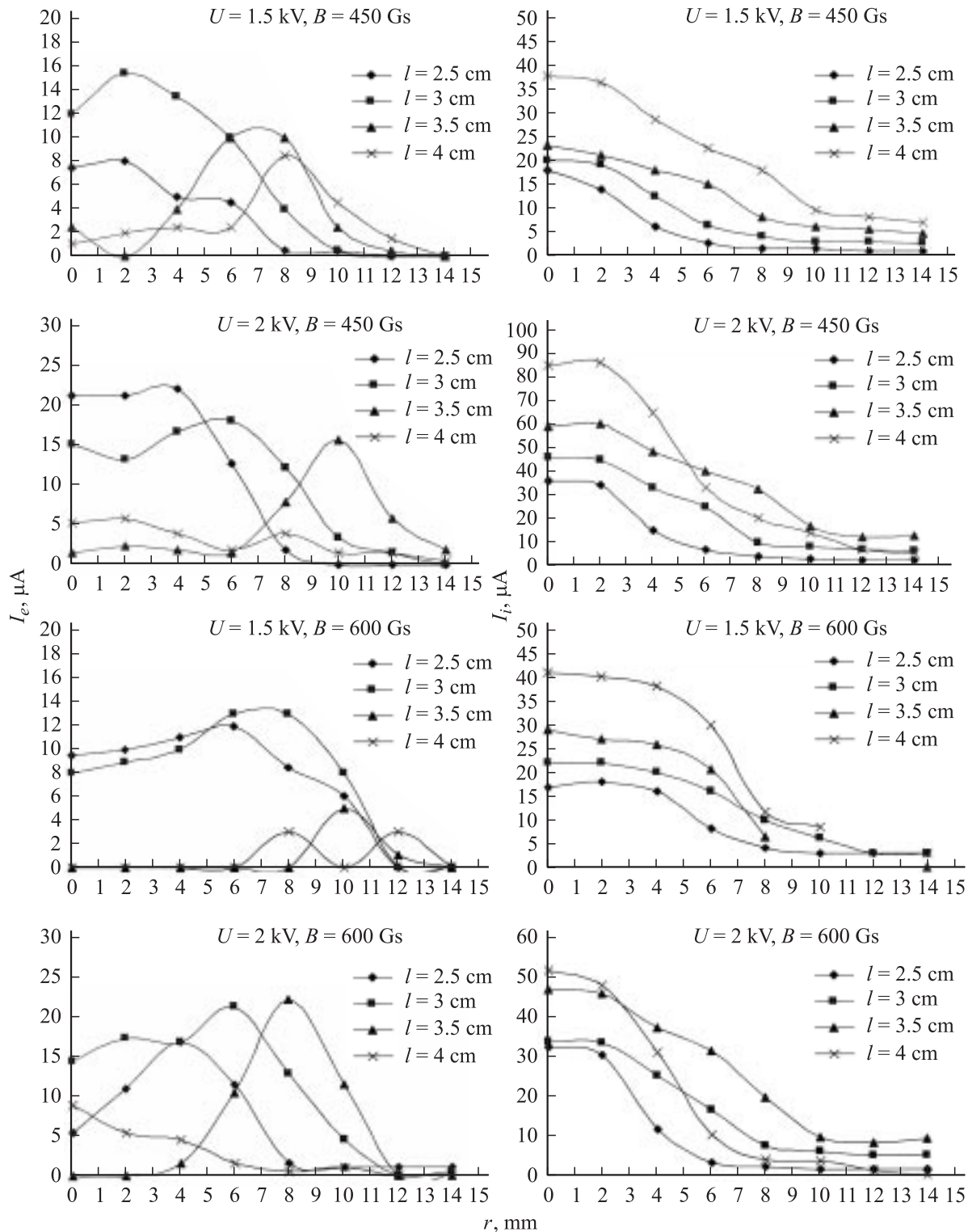


Рис. 4. Зависимости продольного электронного I_e и ионного I_i токов от расстояния до центра катода r .

в длинных разрядных промежутках ($l_a > 4.5$ cm) электронный поток на катод незначительный. В условиях $l_a > 4.5$ cm диокотронная неустойчивость отсутствует, и поток электронов на центральные участки катода обусловлен начальными скоростями γ -электронов. Об

этом свидетельствует и слабая зависимость I_e от B и l_a , а также полное отсутствие таких электронов на периферии катода ($r > 8$ mm) (рис. 4). Видно, что при коротких анодах значительные электронные потоки могут попадать как на центральные $0 < r < 4$ mm, так

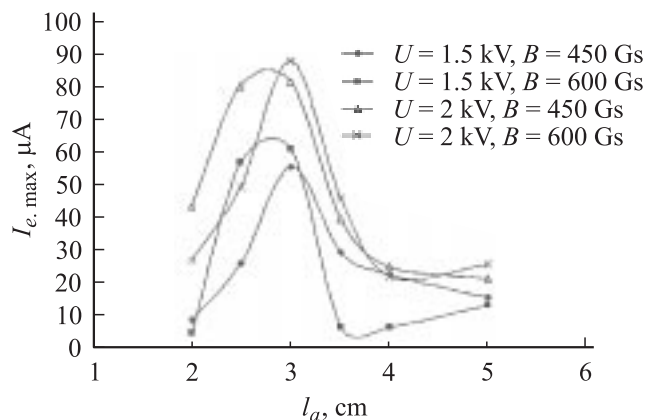


Рис. 5. Зависимости полного электронного $I_{e,full}$ тока на всю радиальную полосу катода от l_a .

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 (рис. 4). На рис. 4 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 электронный ток достигает максимума $I_{e,max} \approx 22 \mu A$ на центральной области катода $0 < r < 4$ мм при длине анода $l_a = 2.5$ см, а при тех же значениях U_a и B ток $I_{e,max} \approx 15 \mu A$ на средней радиальной области $r = 10$ мм, при $l_a = 3.5$ см. В условиях $U_a = 2$ кВ, $B = 600$ Гс максимальный электронный ток почти одинаковый $I_{e,max} \approx 22 \mu A$, на радиальных участках $r = 6$ и 8 мм при длинах анода $l_a = 3$ и 3.5 см.

Увеличение U_a сопровождается ростом I_e на всех радиальных участках. Однако при увеличении магнитной индукции от 450 до 600 Гс на центральных участках катода ($r = 0-4$ мм) электронные потоки уменьшаются, а на средних участках, наоборот, растут (рис. 4). Во II 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 участки катодов не только не уменьшается, но и растет (рис. 4, 5). 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 $I_{e,full} = 82 \mu A$, 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: $I_{e,full} = 88 \mu A$ (рис. 5).

Полный электронный поток на всю радиальную полосу катода, а также большинство электронных потоков, попадающих на его отдельные радиальные участки, принимают наибольшие значения в условиях $l_a = 2.5-3.5$ см. За этим интервалом полные электронные потоки незначительны (рис. 5). Эти результаты объясняются вышеизложенным механизмом формирования и попадания на катоды интенсивных электронных потоков. При изменении длины анода от 3 до 4 см прианодное E_r и n_e уменьшаются, интенсивность диокотронной неустойчивости падает, электронные выбросы в сторону оси и катодов ослабевают, полный электронный ток резко уменьшается (рис. 5). В итоге большинство электронов не достигает до оси разряда и попадает на средние радиальные участки катода (рис. 4). Об этом свидетельствуют и спектрограммы ВЧ-колебаний, снятые с разрядного тока: при $l_a = 3$ см спектр ВЧ-колебаний резко обогащается, амплитуды растут. В условиях же $l_a > 4$ 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) (рис. 5) сопровождается ростом $I_{e,full}$ от 55 до $90 \mu A$ (в 1.6 раза), во столько же раз растет и разрядный ток. С ростом U_a общая ионизация и удержанный магнитным полем электронный пространственный заряд растут. Соответственно растет и $I_{e,full}$, 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 (рис. 5).

Выводы

Экспериментально исследованы условия попадания электронных потоков на катоды пеннинговского разряда. Установлен характер влияния длины разрядного промежутка на величину продольных электронных потоков. Показано, что большой поток электронов на катод для диаметра анода $2r_a = 31$ мм формируется только в коротких анодах, $l_a = 2.5-3.5$ см. Получены распределения электронных и ионных потоков по поверхности катода в различных условиях разряда. Радиальные распределения электронных и ионных потоков существенно отличаются. Плотность продольного электронного тока принимает максимальное значение как в центре, так и на средних радиальных участках поверхности катода. Плотностью, величиной и поперечным сечением ионного и электронного потоков можно управлять, как выбором значений параметров U_a , B , так и путем изменения положения подвижного катода. В длинных пеннинговских трубках, во многих условиях горения разряда, в

частности, когда давление газа $P < 10^{-4}$ Торр, работают только центральные участки катодов; на периферийные участки катодов ионы и электроны не попадают.

Список литературы

- [1] Крейнделъ Ю.Е. Плазменные источники электронов. М.: Атомиздат, 1977.
- [2] Баберцян Р.П., Бадалян Э.С., Егиазарян Г.А., Тер-Геворкян Э.И. // Изв. НАН Армении. Физика. 1999. Т. 34. Вып. 3. С. 183–189.
- [3] Егиазарян Г.А., Бадалян Э.С., Тер-Геворкян Э.И., Новханнысян В.Н. // Proc. XIII Inter. Conf. on Gas Discharges and their Applications, Glasgow, 2000. Vol. 2. P. 671–674.
- [4] Егиазарян Г.А., Хачатрян Ж.Б., Бадалян Э.С., Тер-Геворкян Э.И., Оганесян В.Н. // Изв. НАН Армении. Физика. 2001. Т. 36. Вып. 1. С. 44–49.
- [5] Бориско В.Н., Петрушеня А.А. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 1. С. 86–90.
- [6] Баберцян Р.П., Бадалян Э.С., Егиазарян Г.А., Тер-Геворкян Э.И. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 9. С. 29–32.