

Отрицательная обратная связь по току в ускоряющем промежутке в источниках электронов с плазменным катодом

© М.С. Воробьев,¹ П.В. Москвин,¹ В.И. Шин,¹ Т.В. Коваль,² В.Н. Девятков,¹ С.Ю. Дорошкевич,¹
Н.Н. Коваль,¹ М.С. Торба,¹ К.Т. Ашурова¹

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: vorobyovms@yandex.ru

Поступило в Редакцию 21 января 2022 г.

В окончательной редакции 24 марта 2022 г.

Принято к публикации 28 марта 2022 г.

На примере источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы катодной/эмиссионной плазмы и открытой границей анодной/пучковой плазмы, описан механизм повышения электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка путем введения последовательной отрицательной обратной связи (ООС) по току в ускоряющем промежутке, позволяющий нивелировать неконтролируемые выбросы тока пучка в течение его импульса. Введение ООС достигается за счет использования в пространстве плазменного эмиттера специального электрода, подключенного через сопротивление к аноду дугового разряда, и основной задачей которого является перехват ускоренных ионов, проникающих в эмиттер из высоковольтного ускоряющего промежутка, за счет чего происходит снижение тока эмиссии электронов из плазмы дугового разряда на величину, пропорциональную току ионов в ускоряющем промежутке. Поскольку большинство источников и ускорителей электронов с плазменными катодами на основе разрядов различного типа имеют схожий принцип действия, использование такого способа позволит не только расширить предельные параметры генерируемых электронных пучков, но и повысить стабильность работы таких источников электронов, а соответственно, достичь большей повторяемости режимов электронно-пучкового облучения различных материалов и изделий.

Ключевые слова: дуговой разряд, плазменный катод, источник электронов, электронный пучок, ионный пучок, отрицательная обратная связь.

DOI: 10.21883/JTF.2022.06.52519.14-22

Источники электронов с сетчатыми плазменными катодами являются одними из наиболее перспективных источников электронов при потенциальном рассмотрении их использования в технологических целях [1–4]. В научном поиске оптимальных режимов облучения такие источники обладают уникальным свойством генерации электронного пучка, связанным со слабой взаимозависимостью его основных параметров [5–8]. Данное свойство достигается за счет использования режимов работы плазменного катода в режимах так называемой сеточной/слоевой стабилизации границы эмиссионной плазмы [5,9,10]. К примеру, используя данное свойство плазменных катодов, была продемонстрирована уникальная возможность динамического управления мощностью электронного пучка в течение импульса миллисекундной длительности [11,12], что позволило управлять скоростью ввода энергии в поверхность металлических материалов и даже удерживать температуру поверхности облучаемого образца на уровне тысяч градусов в этом же временном диапазоне [13].

Как и в источниках электронов с катодами другого типа, в источниках электронов с плазменными катодами отдельное внимание исследователей уделяется электрической прочности высоковольтного ускоря-

ющего промежутка, повышение которой, чаще всего, позволяет расширить другие параметры генерируемого пучка (амплитуду, длительность или частоту следования импульсов) [5]. Снижение электрической прочности ускоряющего зазора может происходить в результате зарядки диэлектрических включений на поверхности эмиссионного электрода, нарушения работы плазмогенераторов, нарушения слоевой стабилизации границы эмиссионной плазмы, инициирования катодных пятен на электродах плазменного эмиттера из-за повышения потенциала эмиссионной плазмы и др. Поскольку снижение электрической прочности ускоряющего зазора всегда сопровождается предварительным ростом его тока, то одним из способов повышения электрической прочности можно рассматривать введение отрицательной обратной связи (ООС) по току в ускоряющем промежутке, позволяющей снизить величину этого тока при возникновении какого-либо дестабилизирующего фактора. К таким факторам может относиться рост давления газа, плавление мишени, динамика электронного пучка (пространственные изменения плотности тока пучка в течение его импульса) и др. [5].

Один из способов введения ООС был продемонстрирован в работе [14], в которой авторы достигали

снижения величины тока эмиссии за счет пропорционального уменьшения величины тока дугового разряда и соответственно концентрации эмиссионной плазмы в течение импульса ее генерации. Однако данный способ сложно реализуем в условиях стохастического характера возникновения факторов, дестабилизирующих работу источников и ускорителей электронов с плазменным катодом, поскольку требует введения быстродействующей ООС на уровне сотен кГц и даже единиц МГц, что существенно повышает требования к используемой схематехнике систем электропитания и управления плазменного катода, а соответственно, приводит к их усложнению и удорожанию.

В работах [15,16] был экспериментально продемонстрирован механизм управления током пучка за счет изменения потенциала эмиссионной плазмы. Конструкции данных источников плазмы отличались, но идеи заключались во введении специального управляющего электрода, отделенного от эмиссионной плазмы мелкоструктурной сеткой, на который осуществляется принудительное переключение тока разряда, что в случае работы [15] позволило реализовать режим с высокой (до 100%) эффективностью извлечения электронов из полого анода, когда эмиссионный ток равен току разряда, а ток в цепи управляющего электрода практически равен нулю. Такой механизм управления генерацией электронного пучка основан на снижении тока эмиссии электронов за счет увеличения потенциала эмиссионной плазмы при переключении на специальный управляющий электрод быстрых электронов эмиссионной плазмы, ответственных за перенос тока разряда [17]. Подобный механизм управления током электронного пучка исследуется в настоящей работе как способ самосогласованного введения ООС по току в ускоряющем промежутке за счет бомбардировки специального электрода, расположенного в пространстве плазменного эмиттера, ускоренными ионами, проникающими в эмиттер через ячейки эмиссионной сетки. Так, поскольку электрическая прочность ускоряющего зазора и стабильность работы источника электронов в целом зависят от параметров генерируемого пучка, а в частности, от его амплитуды, то целью настоящей работы является демонстрация и объяснение механизма ООС по току в ускоряющем промежутке, позволяющего стабилизировать его амплитуду в течение импульса субмиллисекундной длительности.

Как и в [11], в настоящей работе использовался источник электронов „СОЛО“ с сеточным плазменным катодом и плазменным анодом с открытой плазменной границей (рис. 1), входящий в перечень уникальных установок России в составе комплекса „УНИКУУМ“, подробный принцип действия которого описан в работе [8]. Данный источник позволяет генерировать электронный пучок со следующими параметрами: энергия электронов до 25 keV, ток пучка 10–300 А, длительность импульсов тока пучка 50–300 μ s при частоте их следования 0.1–5 s^{-1} и диаметре пучка до 40 mm.

Между поджигающим электродом 1 и цилиндрическим магниевым катодом 2 с внутренним диаметром 8 mm и длиной 50 mm при приложении импульса напряжения U_{trig} величиной 12–15 kV зажигается инициирующий (поджигающий) разряд длительностью несколько микросекунд и током в единицы ампер. Основной дуговой разряд горит между катодом 2 и анодными электродами 5, 6 разрядной системы. Анодная вставка 3, электрически соединенная с анодами 5, 6 дугового разряда через токоограничительное сопротивление $R_{НА}$, необходима для облегчения условий зажигания дугового разряда и крепления дополнительного перераспределяющего электрода 4, имеющего с ней электрический контакт. Обычно электрод 4 используется для выравнивания распределения плотности эмиссионного тока [5,18–20]. В настоящей работе электрод 4 был выполнен из ниобия, имел форму диска диаметром 35 mm, толщиной 0.2 mm и был расположен на расстоянии около 20 mm от эмиссионной сетки 5. Постоянное ускоряющее напряжение прикладывается между плоским эмиссионным электродом 6 с мелкоструктурной (0.5 × 0.5 mm) эмиссионной сеткой 5 (они же анодные электроды разрядной системы) диаметром 40 mm и извлекающим электродом 7, выполненным в виде диафрагмы диаметром 80 mm. Извлекающий электрод 7, труба дрейфа 8 и коллектор 10 находятся под потенциалом „земли“. Труба дрейфа имеет внутренний диаметр 82 mm, длина канала транспортировки около 0.5 m. Отбор электронов из эмиссионной плазмы осуществляется через ячейки эмиссионной сетки первоначально под действием электрического поля, создаваемого электродами 7 и 8, а после образования анодной (пучковой) плазмы, ускорение электронов происходит в двойном слое между границами двух плазм: катодной (эмиссионной) и анодной (пучковой).

Важно отметить, что в стандартном для данного электронного источника режиме работы граница эмиссионной плазмы стабилизируется сеткой, а анодная плазма, которая создается самим электронным пучком в пространстве его дрейфа, имеет подвижную (открытую) границу. Электроны пучка, ускоренные в зазоре между катодной и анодной плазмами, транспортируются к коллектору в магнитном поле катушек 9, величина поля в которых может достигать 0.1 Т для первого (от эмиссионной сетки) соленоида и 0.05 Т для второго (указанные величины поля приведены для центра каждого соленоида). Амплитуда и длительность импульса тока пучка задаются амплитудой и длительностью импульса тока основного дугового разряда. В качестве рабочего газа используется аргон. Регулировка давления в экспериментах достигалась за счет напуска газа в разрядную систему источника. Давление газа в рабочей камере варьируется в диапазоне (50–100) mPa, давление газа в основной разрядной ячейке плазменного катода было в несколько раз выше. В качестве датчиков для измерения импульсных токов использовались пояса Роговского.

В источнике электронов с сеточным плазменным катодом и плазменным анодом ток в ускоряющем промежутке I_g определяется несколькими составляющими [5,8,21,22] и может быть записан в виде

$$I_g = \alpha I_d + I_{i2} [1 + (1 - \Gamma)\gamma_2 + \Gamma\gamma_1], \quad (1)$$

где $\alpha = I_{em}/I_d$ — коэффициент извлечения электронов из плазменного эмиттера, равный отношению тока эмиссии I_{em} к току разряда I_d ; I_{i2} — ток ускоренных ионов из анодной плазмы; γ_2 — коэффициент ионно-электронной эмиссии с металла при бомбардировке ускоренными ионами сетки 5 и эмиссионного электрода 6; γ_1 — коэффициент ионно-электронной эмиссии из эмиссионной плазмы за счет ионно-электронных процессов в плазменном эмиттере [21,22]; Γ — эффективная геометрическая прозрачность эмиссионного электрода, позволяющая учитывать поток ионов, прошедших через сетку эмиссионного электрода в плазменный эмиттер. При этом вклад каждого слагаемого может быть разным в зависимости от конкретного типа источника электронов с плазменным катодом, параметров генерируемого электронного пучка, геометрии электродов, их материала, рабочего давления и пр.

Из формулы (1) видно, что величина тока I_g в течение импульса может изменяться в результате нескольких механизмов, а именно: а) в результате изменения доли электронов, извлекаемых из плазменного эмиттера (изменение коэффициента α); б) в результате изменения величины тока ускоренных ионов, порожденных ионизацией остаточного, рабочего, десорбированного газов, а также паров материала мишени, определяющего в том числе величину тока гамма-электронов, рожденных в результате бомбардировки эмиссионного электрода этими ускоренными ионами. Кроме этого, из формулы (1) видно, что часть тока ускоренных ионов, равная $(I_{i2}\Gamma)$, не участвует в наработке гамма-электронов с поверхности эмиссионного электрода, поскольку проникает в пространство плазменного эмиттера через ячейки эмиссионной сетки. Эти ионы приводят к изменению условий генерации эмиссионной плазмы, имея противоречивый характер с точки зрения стабильности работы источника электронов, поскольку, с одной стороны, повышают потенциал эмиссионной плазмы и приводят к неконтролируемому росту ее концентрации [5] (чаще всего локальному), но с другой стороны могут обеспечивать более стабильное горение разряда в пространстве плазменного эмиттера (снижают его импеданс), облегчают иницирование разряда в том числе в модулированном режиме, обеспечивая при необходимости большую паузу между импульсами тока разряда при генерации пачки импульсов тока разряда субмиллисекундной длительности [13].

В итоге можно заключить, что появление в высоковольтном зазоре ускоренных ионов приводит к дестабилизации тока I_g , приводя, чаще всего, к росту его амплитуды, как за счет увеличения коэффициента

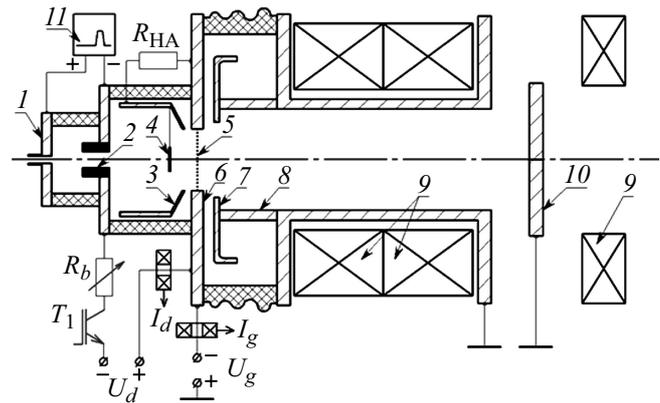


Рис. 1. Схема источника электронов „СОЛО“: 1 — поджигающий электрод, 2 — катод, 3 — полый анод (анодная вставка), 4 — дополнительный электрод (перераспределяющий электрод или электрод обратной связи), 5 — эмиссионная сетка, 6 — эмиссионный электрод, 7 — извлекающий (ускоряющий) электрод, 8 — труба дрейфа, 9 — магнитные катушки, 10 — коллектор, 11 — источник питания поджига.

извлечения α , так и за счет доли гамма-электронов (как с поверхности эмиссионного электрода γ_2 , так и из эмиссионной плазмы γ_1).

С учетом формулы (1) можно также сказать, что ток $I_{НА}$, фиксируемый в цепи резистора $R_{НА}$ представляет собой сумму токов из эмиссионной плазмы (электронной I_e и ионной I_{i1} компоненты), тока ускоренных ионов, прошедших через ячейки сетки в пространство плазменного эмиттера и бомбардирующих электрод 4 только с одной стороны, обращенной к ускоряющему зазору, а также тока электронов, возникающего в результате бомбардировки электрода 4 ускоренными ионами и зависящего от коэффициента ионно-электронной эмиссии γ_3 материала, из которого изготовлен электрод 4:

$$I_{НА} = I_e - I_{i1} - I_{i2}(S_4\Gamma/S_5)(1 + \gamma_3), \quad (2)$$

где S_4 — площадь проекции перераспределяющего электрода на плоскость эмиссионного электрода, ограниченную эмиссионным отверстием, перекрытым сеткой 5 (рис. 1) и S_5 — площадь эмиссионного окна.

Доля тока разряда (компоненты I_e и I_{i1}), замыкающаяся в цепи полого анода и перераспределяющего электрода, падает с ростом величины сопротивления $R_{НА}$. Влияние величины $R_{НА}$ на переключение тока разряда в область эмиссионной сетки и, как принято считать [2,5], соответствующий этому рост коэффициента извлечения α определяется динамикой пристеночного ионного слоя пространственного заряда в ячейках эмиссионной сетки.

Из зависимостей, представленных на рис. 2, снятых для установившихся режимов тока дугового разряда в отсутствие ускоряющего напряжения, видно, что увеличение сопротивления $R_{НА}$ приводит к экспоненциальному снижению тока в цепи полого анода $I_{НА}$,

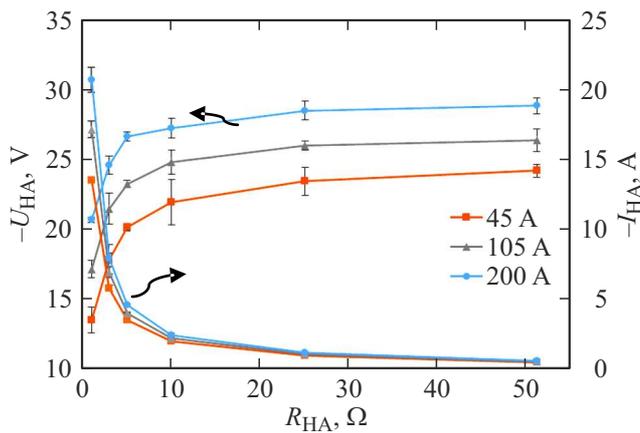


Рис. 2. Зависимость тока I_{HA} и падения напряжения U_{HA} от величины сопротивления R_{HA} при разных токах разряда I_d .

что, прежде всего, связано со снижением доли тока разряда, замыкающейся на электрод 4. Однако здесь также нужно отметить важную особенность, заключающуюся в том, что уменьшение тока I_{HA} при увеличении сопротивления R_{HA} сопровождается ростом напряжения автосмещения U_{HA} (отрицательного относительно анода дугового разряда), которое стремится к насыщению на уровне $-(10-25)$ V и в том числе зависит от амплитуды тока дугового разряда I_d . Наличие этого смещения потенциала U_{HA} и приводит к преимущественному переключению тока разряда в область эмиссионного электрода, повышая эффективность извлечения электронов из плазменного эмиттера в ускоряющий промежуток.

Кроме этого, из формулы (2) следует, что ток I_{HA} также зависит от тока ионов из ускоряющего промежутка I_{i2} . Из представленных на рис. 3 осциллограмм видно, что при $R_{HA} = 0$, когда потенциал электрода 4, анодной вставки 3 и анода 5, 6 дугового разряда одинаковый, амплитуда тока I_{HA} соизмерима с амплитудой тока разряда I_d (рис. 3, a). В этот момент ток разряда преимущественно замыкается по оси системы через электрод 4, что было подтверждено отдельными зондовыми измерениями. При появлении ускоряющего напряжения видно, что в течение первых двадцати микросекунд разряд переключается в область эмиссионной сетки, что приводит к появлению тока I_g , а ток I_{HA} в это время меняет полярность (рис. 3, b), что можно объяснить интенсивной ионной бомбардировкой электрода 4 со стороны ускоряющего промежутка. При этом амплитуда тока I_{HA} обратной полярности также измеряется десятками ампер.

Введение сопротивления R_{HA} в электродную систему эмиттера приводит к снижению тока I_{HA} (рис. 2 и 3, c), но появлению автосмещения U_{HA} . Похожее снижение тока I_{HA} можно наблюдать при повышении давления рабочего газа в отсутствие ускоряющего напряжения, что обусловлено ростом концентрации эмиссионной плазмы и возрастающим током ионов I_{i1} из этой плазмы

на вставку 3 и электрод 4. Из рис. 3, в видно, что в отсутствие ускоряющего напряжения введение сопротивления $R_{HA} = 51$ Ω приводит к появлению высокочастотной модуляции тока I_{HA} с характерной частотой на уровне ≈ 50 kHz (частота модуляции растет с увеличением R_{HA}). Ток разряда I_d при этом имеет практически постоянную амплитуду и ВЧ-модуляции на нем отсутствуют, что говорит о его динамическом перестроении в межэлектродном пространстве плазменного катода. При наличии ускоряющего напряжения U_g и включении дугового разряда — в ускоряющем промежутке появляется ток I_g (рис. 3, d), амплитуда которого имеет явно выраженный максимум в первые десятки микросекунд, также, как и при $R_{HA} = 0$, однако амплитуда этого выброса меньше на $\approx 30\%$, а задержка тока I_g относительно тока I_d практически отсутствует. Наличие тока I_g снова приводит к интенсивной ионной бомбардировке электрода 4 вплоть до изменения полярности тока I_{HA} , что также обусловлено преобладающим влиянием ионной компоненты тока ускоренных ионов над электронной компонентой тока разрядного промежутка. В условиях интенсивной ионной бомбардировки электрода 4 вместе с изменением полярности тока I_{HA} меняется полярность U_{HA} и в пространстве плазменного эмиттера появляются положительно смещенные электроды относительно анода разряда, что приводит к переключению доли тока разряда на эти электроды 3 и 4, а соответственно, к снижению коэффициента извлечения α , и, следовательно, проявляется механизм последовательной ООС по току в ускоряющем промежутке, приводящий к стабилизации его амплитуды. Так, при введении сопротивления R_{HA} именно наличие механизма ООС по току в ускоряющем промежутке за счет фиксации доли его ионной компоненты на электроде, размещенном в пространстве плазменного эмиттера, приводит к соответствующему снижению амплитуды тока I_g .

Важно отметить, что увеличение сопротивления R_{HA} в диапазоне $(0-51)$ Ω и выше приводит к снижению амплитуды выброса тока $I_{HA \max}$ (обратная полярность тока I_{HA} на рис. 3, d) таким образом, что напряжение $U_{HA \max}$ имеет немонотонную функцию, а его максимальное значение изменяется в диапазоне $+(25-35)$ V (рис. 4).

Взаимосвязь основных параметров плазменного катода можно установить из уравнений баланса [21,23,24]. Исходя из уравнения непрерывности тока при условии извлечения электронов с открытой поверхности плазмы и присутствия тока быстрых ионов из ускоряющего промежутка, можно записать соотношение для эффективности извлечения электронов из плазменного катода:

$$\alpha = \left[1 + \frac{S_{5f}}{S_e} \exp\left(-\frac{\phi_a}{kT_e}\right) + \frac{S_3}{S_e} \exp\left(-\frac{\phi_{HA}}{kT_e}\right) + \frac{S_4}{S_e} \exp\left(-\frac{\phi_{HA} - \phi_l}{kT_e}\right) \right]^{-1} \quad (3)$$

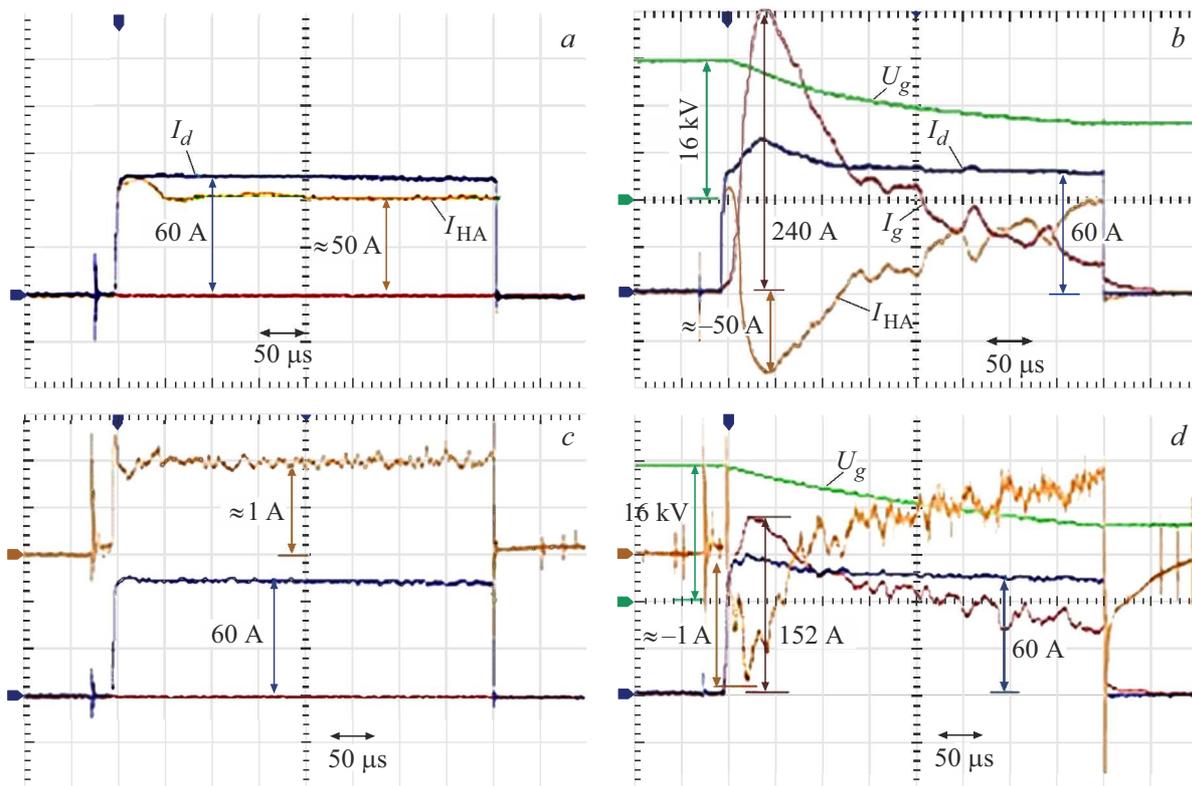


Рис. 3. Характерные осциллограммы тока разряда I_d (синий (в онлайн версии)), тока анодной вставки I_{HA} (коричневый (в онлайн версии)), тока в ускоряющем промежутке I_g (бордовый (в онлайн версии)), ускоряющего напряжения U_g (зеленый (в онлайн версии)) при $R_{HA} = 0$ (a, b) и 51Ω (c, d) в отсутствие (a, c) и при наличии (b, d) ускоряющего напряжения $U_g = 16 \text{ kV}$.

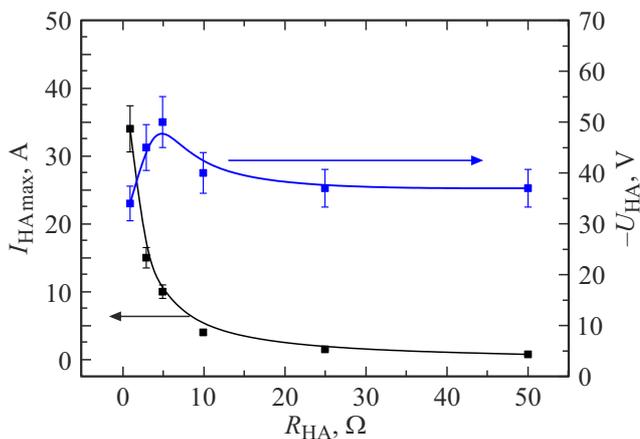


Рис. 4. Зависимость максимума тока $I_{HA \max}$ (момент максимума тока $I_{HA \max}$ совпадает с максимумом тока в ускоряющем промежутке I_g) и падения напряжения $U_{HA \max}$ от величины сопротивления R_{HA} .

Здесь S_e — площадь эмиссионной поверхности плазмы, S_4 — площадь перераспределяющего электрода, S_{5f} и S_3 — площади металлических поверхностей сеточного электрода и анодной вставки, ϕ_a и ϕ_{HA} — потенциалы плазмы относительно анода и относительно полого анода, ϕ_i — потенциал, обусловленный током быстрых

ионов на электрод 4, T_e — температура электронов, k — постоянная Больцмана. Слагаемые в соотношении (3) есть относительные токи электронов на эмиссионный электрод, анодную вставку и перераспределяющий электрод, здесь не рассматривается ток плазменных ионов. Из формулы (3) видно, что увеличение сопротивления R_{HA} в цепи полого анода и соответственно потенциала ϕ_{HA} приводит к увеличению коэффициента извлечения α . Однако с увеличением ионной компоненты тока ускоренных ионов на перераспределяющий электрод 4 разность потенциалов $(\phi_{HA} - \phi_i)$ уменьшается, что приводит к уменьшению α .

В итоге в настоящее время известно большое количество источников и ускорителей электронов с плазменным катодом, генерирующих пучки различной конфигурации, и в конструкции эмиттера которых находится перераспределяющий электрод. Чаще всего такой электрод вводится для выравнивания плотности тока пучка по его сечению, переключению тока разряда в область эмиссионной сетки с целью повышения энергетической эффективности плазменного эмиттера и уменьшения задержки генерации пучка относительно фронта генерации тока разряда. В отличие от всех этих работ в настоящей работе экспериментально продемонстрировано, что в условиях замыкания ускоренных ионов на специальный электрод, размещенный в межэлектродном

пространстве плазменного эмиттера и подключенный через сопротивление к аноду разряда — эмиссионному электроду, возникает последовательная ООС по току в ускоряющем промежутке, основанная на снижении тока эмиссии за счет переключения доли тока разряда на этот электрод. Стабилизация тока разряда важна не только с точки зрения управляемости параметрами генерируемого электронного пучка, что крайне важно для любого технологического процесса, но и позволяет повысить электрическую прочность высоковольтного ускоряющего промежутка в источниках электронов такого типа, заключающуюся в кратном снижении его электрических пробоев, что также отмечалось при проведении описанных в настоящей работе экспериментов. Для демонстрации эффекта последовательной ООС давление рабочего газа было специально выбрано завышенным (около 100 мПа), и при увеличении сопротивления $R_{\text{НА}}$ в диапазоне $R_{\text{НА}} = (0-5) \text{ k}\Omega$ при постоянной уставке тока разряда $I_d = 20 \text{ A}$ (уставка тока осуществлялась в отсутствие ускоряющего напряжения) неконтролируемый выброс тока в ускоряющем промежутке снизился с $I_g = 240$ до 140 А, что свидетельствует об эффективности ООС по току. Предложенный и апробированный метод позволит расширить диапазон устойчивой работы источника электронов с плазменным катодом, а соответственно и сферу его применений.

Финансирование работы

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10015).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, S.V. Vorobiev, S.V. Konovalov, *Fatigue of Steels Modified by High Intensity Electron Beams* (Cambridge, 2015), 272 p.
- [2] В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовник, Е.М. Окс, Ю.Г. Юшков, *Форвакуумные плазменные источники электронов* (Изд-во Томского ун-та, Томск, 2014), 288 с.
- [3] Н.Н. Коваль, В.Н. Девятков, М.С. Воробьев. Изв. вузов. Физика, **63** (10), 7–16 (2020). DOI: 10.17223/00213411/63/10/7
- [4] А.Б. Белов, О.А. Быценко, А.В. Крайников, А.Ф. Львов, А.С. Новиков в сб. *Сильноточные импульсные электронные пучки для авиационного двигателестроения*, под ред. А.С. Новикова, В.А. Шулова, В.И. Энгелько (Дипак, М., 2012), 292 с.
- [5] Н.Н. Коваль, Е.М. Окс, Ю.С. Протасов, Н.Н. Семашко, *Эмиссионная электроника* (Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009), 596 с. [Е.М. Окс *Plasma Cathode Electron Sources — Physics, Technology, Applications* (WILEY-VCH, NY., 2006), p. 172. DOI: 10.1002/3527609415]
- [6] Н.В. Гаврилов, В.В. Осипов, О.А. Буреев, Д.Р. Емлин, А.С. Каменецких, В.А. Шитов. Письма в ЖТФ, **31** (3), 72 (2005).
- [7] М.С. Воробьев, С.А. Гамермайстер, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, П.М. Щанин, Письма в ЖТФ, **40** (12), 24 (2014). [M.S. Vorobyov, S.A. Gamermaister, V.N. Devyatkov, N.N. Koval, S.A. Sulakshin, P.M. Shchanin. Tech. Phys. Lett., **40** (12), 506 (2014). DOI:10.1134/S1063785014060261]
- [8] N.N. Koval, S.V. Grigoryev, V.N. Devyatkov, A.D. Teresov, P.M. Schanin. IEEE Trans. Plasma Sci., **37** (10), 1890 (2009). DOI: 10.1109/tps.2009.2023412
- [9] А.В. Жаринов, Ю.А. Коваленко, И.С. Роганов, П.М. Терюканов. ЖТФ, **56** (1), 66 (1986).
- [10] А.В. Жаринов, Ю.А. Коваленко, И.С. Роганов, П.М. Терюканов. ЖТФ, **56** (4), 687 (1986).
- [11] М.С. Воробьев, П.В. Москвин, В.И. Шин, Н.Н. Коваль, К.Т. Ашурова, С.Ю. Дорошкевич, В.Н. Девятков, М.С. Торба, В.А. Леванисов. Письма в ЖТФ, **47** (10), 38 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.10.50972.18719
- [12] M.S. Vorobyov, N.N. Koval, P.V. Moskvin, A.D. Teresov, S.Yu. Doroshkevich, V.V. Yakovlev, V.I. Shin, J. Phys.: Conf. Ser., **1393**, 012064 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1393/1/012064
- [13] M.S. Vorobyov, T.V. Koval, V.I. Shin, P.V. Moskvin, My Kim An Tran, N.N. Koval, K. Ashurova, S.Yu. Doroshkevich, M.S. Torba. IEEE Trans. Plasma Sci., **49** (9), 2550 (2021). DOI: 10.1109/TPS.2021.3089001
- [14] S.Yu. Doroshkevich, M.S. Vorobyov, V.V. Yakovlev. IOP Conf. Series, **1115**, 022017 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1115/2/022017
- [15] V.I. Gushenets, P.M. Schanin. Russ. Phys. J., **44** (9), 962 (2001). DOI: 10.1023/A:1014362023321
- [16] R. Gunzel. Vac. Sci. Technol., **17** (2), 895 (1999).
- [17] В.Л. Галанский, Ю.Е. Крейндел, Е.М. Окс, А.Г. Рипп, П.М. Щанин. ТВТ, **25** (5), 880 (1987).
- [18] Л.Г. Винтизенко, Н.В. Гаврилов, Н.Н. Коваль, Ю.Е. Крейндел, В.С. Толкачев, П.М. Щанин. *Импульсные высоковольтные источники электронов с плазменным эмиттером для формирования пучков большого сечения, в книге Источники электронов с плазменным эмиттером*, под ред. Ю.Е. Крейндела (Наука, Новосибирск, 1983), с. 41–59.
- [19] С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндел, П.М. Щанин. *Электронные пучки большого сечения* (Энергоатомиздат, М., 1984), 112 с.
- [20] I.Yu. Bakeev, A.V. Kazakov, A.V. Medovnik, E.M. Oks, J. Phys.: Conf. Ser., **1488**, 012001 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1488/1/012001
- [21] В.А. Груздев, Ю.Е. Крейндел, Ю.М. Ларин. ТВТ, **11** (3), 482 (1973).
- [22] В.А. Груздев, Ю.Е. Крейндел, Ю.М. Ларин. ЖТФ, **43** (11), 2318 (1973).
- [23] Н.В. Гаврилов, Д.Р. Емлин, А.С. Каменецких. ЖТФ, **10**, 59 (2008).
- [24] Т.В. Коваль, Ле Ху Зунг. Изв. вузов. Физика, **57** (3–2), 118 (2014).