

Плазменный эмиттер для субмиллисекундного электронного пучка на основе несимметричного отражательного разряда

С. В. Григорьев, П. В. Москвин, А. Д. Тересов

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Россия, Томск
e-mail: grigoriev@opee.hcei.tsc.ru

Представлены результаты по исследованию плазменных эмиттеров электронов на основе несимметричного отражательного разряда и отражательного разряда с катодным пятном. В первом случае использовался стандартный сеточный плазменный катод на основе импульсного дугового разряда, а анодная плазма формировалась с помощью несимметричного отражательного разряда, возникающего при прохождении электронного пучка через трубу дрейфа, помещенную в аксиальное магнитное поле 30 мТ. Показано, что часть вторичных плазменных электронов каскада имеют энергию, превышающую потенциал ионизации рабочего газа Ag и при их удержании в разряде могут существенно усиливать концентрацию анодной плазмы, что, в свою очередь, приводит к кратному усилению тока пучка за счет ионно-электронной эмиссии, возникающей на поверхности эмиссионного электрода. В экспериментах с эмиттером на основе отражательного разряда с катодным пятном зафиксировано кратное усиление тока плазменного катода при генерации электронного пучка с энергией до 20 keV.

Введение

При исследовании генерации субмиллисекундного низкоэнергетического (15–20 keV) электронного пучка в диоде с сеточным плазменным катодом и открытой границей анодной плазмы обнаружено, что ток пучка может существенно (в некоторых случаях кратно) увеличиваться за счет возникающей на поверхности эмиссионного электрода ионно-электронной эмиссии [1]. С помощью калориметрических измерений по предложенной в [2] методике а также с помощью зондовых измерений показано, что величина плотности обратного ионного тока на эмиссионный электрод может достигать $I_i \sim 1 \text{ A/cm}^2$, а в пространстве дрейфа электронного пучка существует плазма с концентрацией $n_e \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. По оценкам, сделанным ранее, такая концентрация плазмы не может быть обеспечена ионизацией рабочего газа Ag только ускоренными электронами пучка (15–20 keV). Ионизация газа электронами пучка дает концентрацию $n_e \sim 10^{11} - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Одним из возможных дополнительных механизмов ионизации газа может служить ионизация вторичными электронами каскада, средняя энергия которых не более 100 eV. Если реализовать удержание хотя бы части электронов каскада, то они смогут обеспечить эффективный механизм ионизации газа при низком давлении.

В настоящей работе представлены результаты исследований усиления ионно-электронной эмиссии с помощью несимметричного отражательного разряда, генерируемого в пространстве дрейфа электронного пучка, а также измерение энергии электронов каскада, возникающих при ионизации рабочего газа электронами пучка.

Кроме того, приведены результаты исследования плазменного эмиттера на основе отражательного разряда с катодным пятном.

Эксперимент

В экспериментах использовался электронный источник СОЛЮ, принцип работы и схема которого подробно описаны в [3]. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

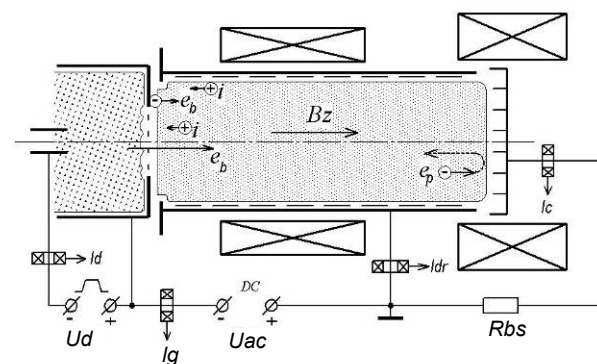


Рис. 1. Схема эксперимента

Отражательный разряд формировался в трубе дрейфа диаметром 80 mm и длиной 250 mm, находящейся под потенциалом земли (анод) и помещенной в продольное магнитное поле ~ 30 mT, образуемое катушками Гельмгольца. Катодный потенциал 10 ~ 15 kV прикладывался к сеточному эмиссионному электроду. Роль второго катода отражательного разряда играл торцевой коллектор, соединенный через сопротивление R_{bs} с трубой дрейфа (анодом). Эмиссионный электрод был выполнен из нержавеющей стали и представлял собой пластину диаметром 82 mm с центральным эмиссионным отверстием диаметром 40 mm, которое перекрывалось мелкоструктурной сеткой с прозрачностью 50 %. Первичные электроны извлекались через сетку из газоразрядной ячейки плазменного катода. Ускоряющий промежуток формировался между поверхностью эмиссионного электрода и открытой подвижной границей анодной плазмы с помощью источника постоянного напряжения. Катодная плазма стабилизировалась сеткой. Ионы, извлеченные с границы анодной плазмы и ускоренные до величины ускоряющего потенциала, выбивали вторичные электроны с металлической поверхности эмиссионного электрода, которые также ускорялись, внося существенный вклад в ток пучка. При прохождении электронного пучка через трубу дрейфа происходила прямая ионизация рабочего газа Ag. Электроны пучка e_b с энергией 10 ~ 15 keV проходили на коллектор, в то время как для плазменных электронов e_p , созданных пучком, на коллекторе возникал отражающий потенциал, который зависел как от величины тока на коллектор, так и от сопротивления R_{bs} . Величина R_{bs} варьировалась от 0 до 3 Ohm. Таким образом, сформированный разряд можно назвать отражательным только для плазменных электронов. Давление газа в рабочей камере варьировалось в диапазоне $(1,4 - 2,5) \times 10^{-2}$ Pa. Так как напуск газа осуществлялся в электронный источник, реальное давление в области транспортировки электронного пучка было выше, причем в области эмиссионной сетки оно превышало измеренные значения в 4 ~ 5 раз. Ток разряда в электродной системе плазменного катода I_d , ток в

ускоряющем промежутке I_g , ток на трубу дрейфа I_{dr} и ток на коллектор I_c измерялись с помощью поясов Роговского, для измерения ускоряющего напряжения использовался резистивный делитель напряжения. Проводились измерения тока в ускоряющем промежутке, в зависимости от отражающего потенциала на коллекторе, а также калориметрические измерения интегральной энергии пучка. Для измерения распределения плотности энергии по сечению пучка на коллекторе использовался секционированный калориметр, который состоял из 9 медных датчиков диаметром 5 mm каждый, расположенных в одну линию на расстоянии 15 mm друг от друга (расстояние между центрами датчиков). Кроме того, для индикации потерь энергии пучка при транспортировке во всех экспериментах внутри трубы дрейфа располагался секционированный калориметр в виде 8 медных колец диаметром 80 mm и шириной 25 mm. Коллектор располагался практически вплотную к торцу трубы-калориметра.

На рис. 2 показаны осциллограммы токов разряда в газоразрядной ячейке плазменного катода I_d , тока в ускоряющем промежутке I_g и тока, измеряемого на коллекторе для экспериментов без сопротивления в цепи коллектора (a) и с сопротивлением 1,5 Ohm (b), а также соответственно представлены результаты калориметрических измерений энергии пучка на коллекторе и потерь на трубу дрейфа.

На рис. 2a видно, что ток в ускоряющем промежутке ~ 60 A превышает ток разряда (50 A) за счет ионно-электронной эмиссии [1]. В то же время средний за импульс ток ускоренных электронов пучка, рассчитанный по калориметрическим измерениям и осциллограммам, составляет ~ 42 A, а обратный ионный ток ~ 12 A. Ток, измеряемый на коллекторе ~ 75 A, превышает и ток разряда, и ток пучка за счет появления потока плазменных электронов на коллектор. Энергия, измеренная на коллекторе, составила $\sim 38,9$ J. При установке сопротивления в цепи коллектора видно, что, с одной стороны, существенно увеличивается ток в ускоряющем промежутке (по амплитуде ~ 240 A).

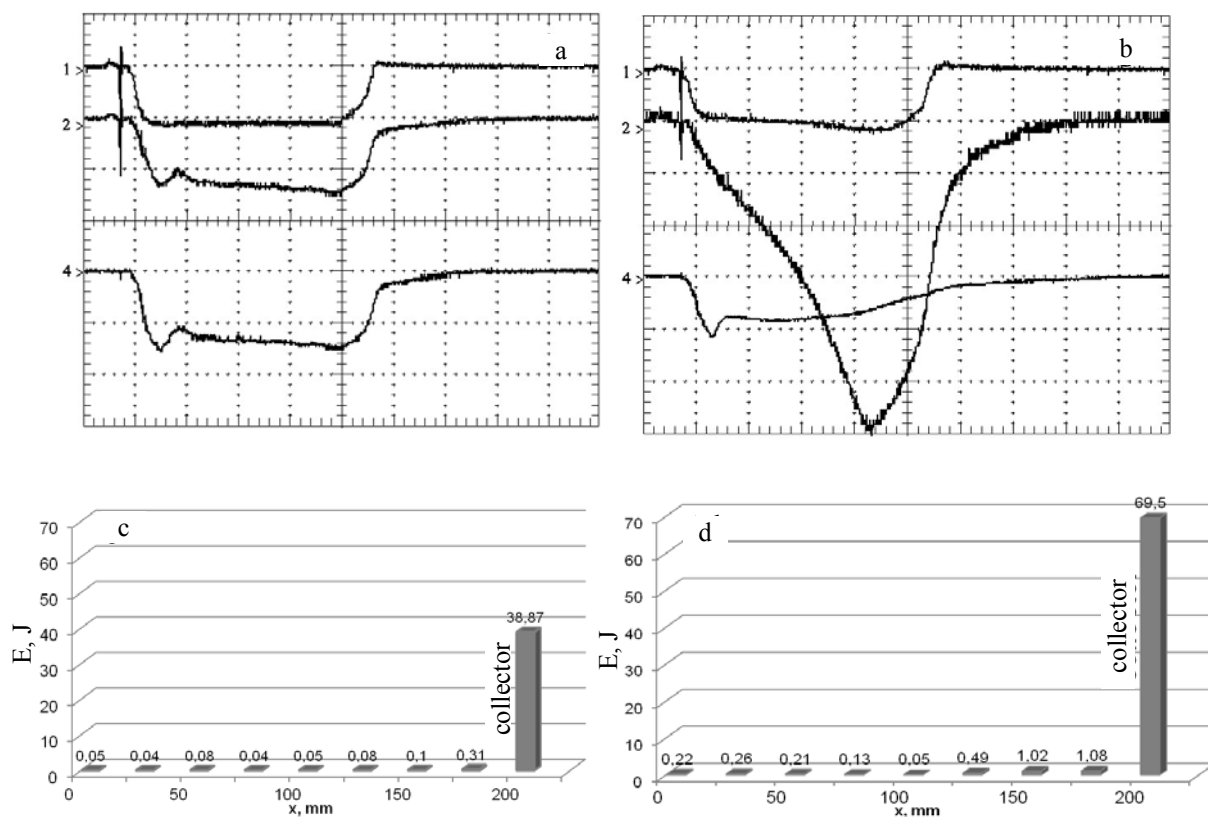


Рис. 2. Характерные осциллограммы импульсов тока для случая с сопротивлением 1,5 Ohm в цепи коллектора (*b*) и без него (*a*), соответствующие им значения интегральной энергии, измеренной на коллекторе, и потерь энергии пучка на трубу дрейфа (*c*; *d*): 1 – ток разряда I_d ; 2 – общий ток в ускоряющем промежутке I_g ; 4 – ток коллектора I_c ; $P = 1,4 \times 10^{-2}$ Pa ; $U_{ac} = 10$ kV. Масштаб 40 A/div, 25 μ s/div

При этом возрастает энергия, измеряемая на коллекторе (69,5 J, что соответствует среднему за импульс току пучка 85 A и обратному ионному току 12 A). С другой стороны, уменьшается ток, измеряемый на коллекторе ~ 30 A.

Представленные осциллограммы можно объяснить следующим образом. При установке сопротивления между коллектором и трубой дрейфа (потенциал земли) для плазменных электронов, идущих на коллектор, формируется отражающий потенциал. Плазменные электроны, совершают многочисленные осцилляции, отражаясь от эмиссионного электрода и коллектора. При этом существенно увеличивается длина пробега плазменных электронов и, следовательно, увеличивается вероятность ионизации молекул рабочего газа, в том случае, если часть плазменных электронов имеет энергию выше потенциала ионизации рабочего газа (для Ag = 15,8 eV). Из осциллограмм и калориметрических измерений видно, что при установке R_{bs} увеличивается обратный ионный

ток на эмиссионный электрод, а, следовательно, и ток вторичных электронов с него за счет ионно-электронной эмиссии. Уменьшение тока, измеряемого на коллекторе, свидетельствует как об отражении части плазменных электронов, так и о возможной компенсации части электронного заряда приходящими на коллектор положительными ионами.

Интегральная энергия, измеренная на коллекторе, практически пропорциональна среднему за импульс току пучка. Небольшое отличие можно объяснить просадкой ускоряющего напряжения при существенном увеличении тока в ускоряющем промежутке. По измерениям потерь на трубу дрейфа видно, что суммарные потери в обоих случаях не превышают 5 % от общей энергии пучка.

Для выяснения динамики изменения тока в ускоряющем промежутке от величины отражающего потенциала, а также для оценки энергии электронов каскада проведены эксперименты по измерению тока в ускоряющем промежутке при различных значениях тока

разряда и сопротивления R_{bs} . При этом для каждого измерения фиксировалась амплитуда отражающего потенциала. Импульс тока в ускоряющем промежутке при установке сопротивления в цепь коллектора имел форму, отличную от прямоугольной, и в некоторых случаях мог отличаться по длительности от тока разряда. Поэтому для построения графиков использовали измеренное количество заряда, перенесенного через ускоряющий промежуток.

На рис. 3 показаны зависимости количества общего заряда, перенесенного через ускоряющий промежуток от величины отражающего потенциала на коллекторе для различных значений тока в газоразрядной ячейке плазменного катода.

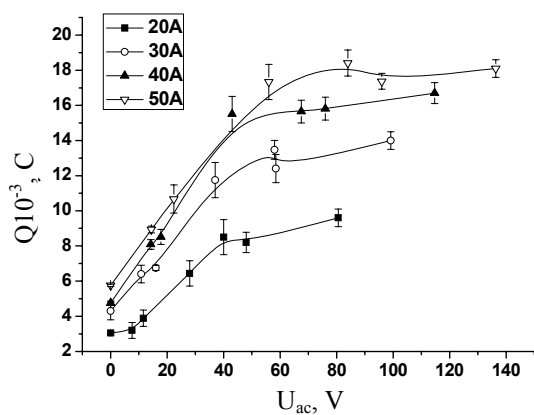


Рис. 3. Количество заряда, перенесенного через ускоряющий промежуток, в зависимости от величины отражающего потенциала коллектора для нескольких значений тока в газоразрядной ячейке плазменного катода: $P = 1,4 \times 10^{-2} Pa$; $U_{ac} = 10 kV$; $\tau = 100 \mu s$

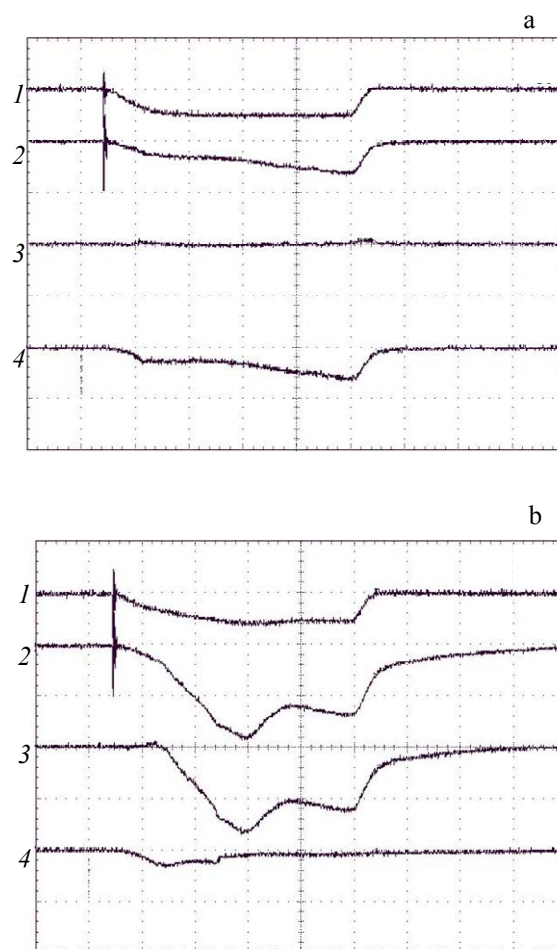
Видно, что при значениях отражающего потенциала 40–50 В рост кривых замедляется. При этом чем больше значение тока разряда, тем более пологий участок насыщения. Наличие участка насыщения может быть обусловлено приближением к 100 % ионизации рабочего газа, либо немаксвелловским распределением плазменных электронов по скоростям в области энергий $> 30 \sim 40 eV$.

Необходимо заметить, что плазменные электроны фиксировались на коллекторе вплоть до величины отражающего потенциала $\sim -22 V$, несмотря на то, что при подаче отрицательного потенциала на коллектор из

плазмы поступают положительные ионы, которые компенсируют часть электронного тока.

Режим генерации с эффектом отражательного разряда привел также к некоторому уширению профиля пучка. На рис. 4 приведены распределения плотности энергии по сечению пучка для пучка с энергией 15 keV для случая без сопротивления в цепи коллектора (a) и с сопротивлением 1,5 Ohm (b). На соответствующих осциллограммах видно, что при установке сопротивления в цепи трубы дрейфа появляется импульс электронного тока, напоминающий по форме ток в ускоряющем промежутке.

При увеличении рабочего давления до $2,5 \times 10^{-2} Pa$ наблюдается некоторый рост тока в ускоряющем промежутке и соответственно обратного ионного тока и тока пучка (рис. 5). Максимальные значения количества заряда на графиках соответствуют значениям среднего за импульс тока электронного пучка 115 А и обратного ионного тока 65 А.



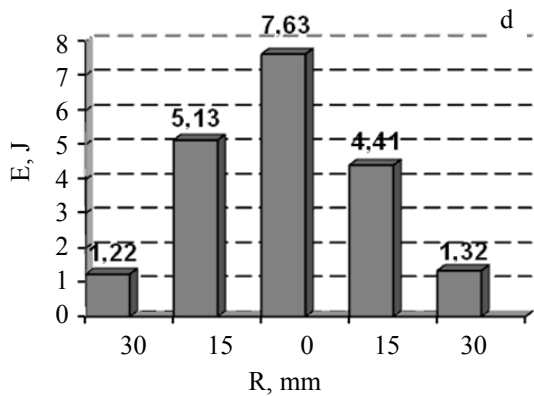
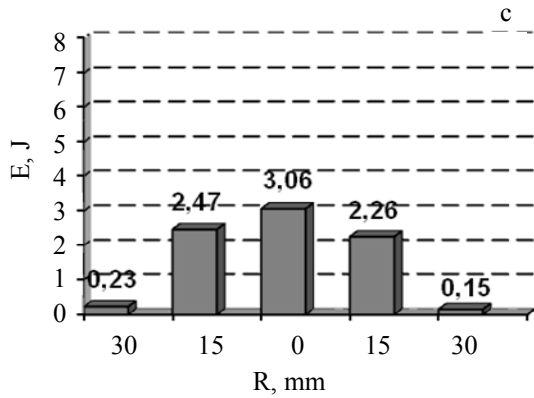


Рис. 4. Осциллограммы импульсов тока для случая с сопротивлением 2 Ohm в цепи коллектора (b) и без него (a) и соответствующие им распределения плотности энергии по сечению пучка на коллекторе (c; d): 1 – ток разряда I_d ; 2 – общий ток в ускоряющем промежутке I_g ; 3 – ток трубы дрейфа I_{dr} ; 4 – ток коллектора I_c ; $P = 1,4 \times 10^{-2}$ Pa; $U_{ac} = 15$ kV. Масштаб 100 A/div, 25 μ s/div

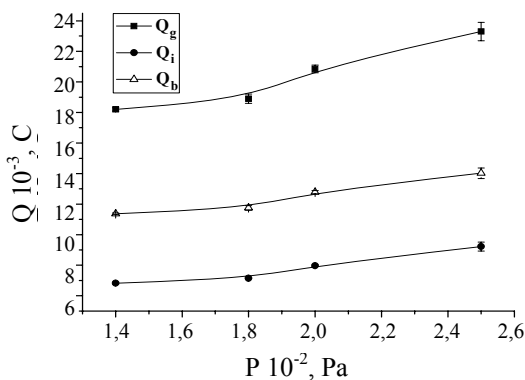


Рис. 5. Количество заряда, перенесенного через ускоряющий промежуток, в зависимости от давления: $R_{bs} = 3$ Ohm; $U_{bs} = 140$ V; $I_d = 50$ A; $U_{ac} = 10$ kV; $\tau = 100$ μ s

Вторая часть эксперимента заключалась в исследовании плазменного эмиттера на основе отражательного разряда с катодным пятном. Схема представлена на рис. 6.

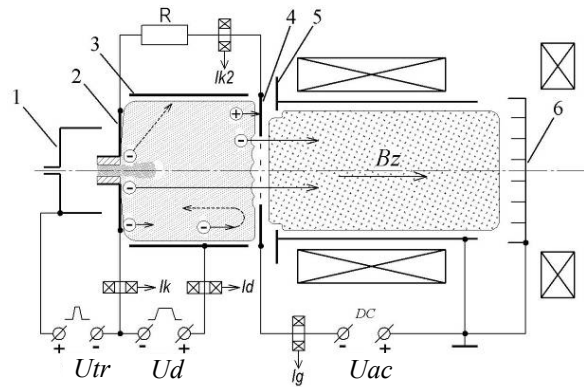


Рис. 6. Схема эксперимента: 1 – анод поджигающей ячейки; 2 – катод поджигающей ячейки, катод-эммитер основной разрядной ячейки; 3 – анод основной разрядной ячейки; 4 – катод-отражатель основной разрядной ячейки, эмиссионный электрод; 5 – извлекающий электрод с трубой дрейфа; 6 – коллектор

В стандартной газоразрядной ячейке плазменного катода электронной пушки СОЛО был реализован отражательный разряд с катодным пятном. Катодом-отражателем является электрод с эмиссионной сеткой. Катод-отражатель был подключен либо через резистор R , либо непосредственно к цепи катода основного разряда. Индукция магнитного поля в области кольцевого анода отражательного разряда в экспериментах составляла 20–30 мТл, несмотря на то что магнитная катушка располагалась за его пределами в области транспортировки пучка. Осциллограммы тока основного разряда и тока в ускоряющем промежутке представлены на рис. 7.

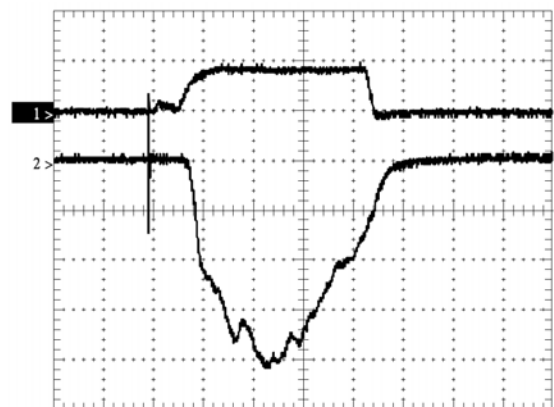


Рис. 7. Плазменный эмиттер на основе отражательного разряда с катодным пятном: осциллограммы тока основного разряда (1) и тока в ускоряющем промежутке (2): $P = 3,5 \times 10^{-2}$ Pa, $R = 0$ Ohm, $I_d = 35$ A, $U_{ac} = 10$ kV. Масштаб 40 A/div, 50 μ s/div

Видно что, ток в ускоряющем промежутке также кратно превышает ток разряда плазменного катода. В некоторых случаях удавалось получить шестикратное превышение, причем не прослеживалось существенной зависимости увеличения тока от рабочего давления, в то время как с возрастанием ускоряющего напряжения ток пучка увеличивался значительно. Такой режим генерации существенно отличался от усиления тока пучка за счет ионно-электронной эмиссии. Можно предположить следующий механизм работы эмиттера. Соединение эмиссионной сетки и катода разряда с высоким отрицательным потенциалом ускоряющего напряжения приводит к усилению тока первоначально созданного катодного пятна (40–50 А) за счет источника ускоряющего напряжения. Плотная плазма катодного пятна замыкает ускоряющий промежуток на катоде разряда, в то время как в области эмиссионного электрода на более «редкой» газоразрядной плазме формируется ускоряющий промежуток. Обнаружено, что даже при небольшом увеличении тока разряда плазменного катода (с 50 до 60 А) происходит пробой ускоряющего промежутка. Это свидетельствует о сильно выраженной зависимости данного режима эмиссии электронов от тока разряда в ячейке плазменного катода. При установке сопротивления R (рис. 6) ток эмиссии ограничивался этим сопротивлением и при величине 2,4 Ohm не превышал ток основного разряда.

Заключение

Экспериментально показано, что высокая ($\sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) концентрация анодной плазмы, возникающей при прохождении электронным пучком пространства дрейфа может быть обеспечена через ионизацию рабочего газа плазменными электронами с энергией выше потенциала ионизации рабочего газа Ar.

Режим генерации электронного пучка с использованием несимметричного отражательного разряда (отражение только плазменных электронов, электроны пучка проходят без существенных потерь на коллектор) позволяет значительно (кратно) увеличить ток пучка за счет усиления ионно-электронной

эмиссии, по сравнению со схемой, без отражения плазменных электронов.

Кратное усиление эмиссии электронов в плазменном эмиттере на основе отражательного разряда с катодным пятном происходит вследствие усиления тока катодного пятна на катоде основного разряда при подключении к нему отрицательного потенциала от источника ускоряющего напряжения. В настоящий момент данный эффект требует дополнительных исследований. Необходимо получить зависимости тока эмиссии от величины тока основного разряда, ускоряющего напряжения, определить реальный коэффициент извлечения электронов, величину и степень влияния ионно-электронной эмиссии в ускоряющем зазоре.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-08-00251-а, гранта программы Президиума РАН № 12 и интеграционного проекта СО РАН № 104.

Литература

1. Koval N. N., Grigoryev S. V., Devyatkov V. N., Teresov A. D., Schanin P. M. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. Vol. 37. № 10. P. 1890–1896.
2. Григорьев С. В., Девятков В. Н., Коваль Н. Н., Тересов А. Д. // Письма ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 4. С. 23–31.
3. Teresov A. D., Astrelin V. T., Devjatkov V. N., Gavrilov N. V., Grigoriev S. V., Kandaurov I. V., Koval N. N. Investigation of characteristics of sub-millisecond electron source with the plasma cathode and the opened boundary of anode plasma // Proc. 16th Symp. on High Current Electronics. Tomsk: Publishing House, 2010. P. 92–95.