

04;10

## **Эффект усиления эмиссии при генерации низкоэнергетического субмиллисекундного электронного пучка в диоде с сеточным плазменным катодом и открытой границей анодной плазмы**

© С.В. Григорьев, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, А.Д. Тересов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: grigoriev@opee.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 25 июня 2009 г.

Представлены результаты исследования эффекта усиления эмиссии электронов в плазмонаполненном диоде на основе плазменного катода с сеточной стабилизацией границы плазмы при ускоряющем напряжении до 20 кВ. Суть явления состоит в том, что при увеличении рабочего давления  $\geq 10^{-2}$  Па и продольного магнитного поля  $\geq 20$  мТ происходит существенное (в некоторых случаях в 2 и более раз) увеличение тока в ускоряющем промежутке. Экспериментально показано, что наиболее вероятным механизмом, ответственным за данное явление, является вторичная ионно-электронная эмиссия, возникающая с поверхности эмиссионного электрода, в результате ее бомбардировки ионами, поступающими из плазмы, генерируемой электронным пучком в пространстве дрейфа, и ускоренными в слое пространственного заряда между поверхностью эмиссионного электрода и открытой границей пучковой (анодной) плазмы.

В последние несколько лет для работ по модификации поверхности металлических и металлокерамических материалов интенсивно используются субмиллисекундные (до 200  $\mu$ s) и низкоэнергетические (до 20 keV) электронные пучки, генерируемые в электронном источнике с сетчатым плазменным катодом и открытой границей анодной плазмы [1,2]. Анодная плазма в таких источниках формируется самим пучком при прохождении им пространства дрейфа и ионизации рабочего газа. Авторами было обнаружено, что при увеличении рабочего давления  $p \geq 10^{-2}$  Па и при наложении продольного магнитного поля  $B_z \geq 20$  мТ в такой системе существенно (в некоторых случаях в 2

и более раз) увеличивается ток в ускоряющем промежутке, превосходя по абсолютной величине ток разряда, генерирующего плазму в электродной системе сетчатого плазменного катода. Известно, что в традиционных системах эффективность электронных источников с плазменным катодом определяется коэффициентом извлечения электронов из разрядной ячейки плазменного катода. Причем коэффициент извлечения  $\alpha$ , равный отношению тока пучка  $I_b$  к току разряда  $I_d$ , для таких систем  $\alpha = (I_b/I_d) \leq 1$ . [3]. Если предположить, что весь ток в ускоряющем промежутке переносится электронами, эмитированными из катодной плазмы через ячейки эмиссионной сетки, то коэффициент извлечения  $\alpha$  должен быть  $\leq 1$  и ток в ускоряющем промежутке не должен превышать ток основного разряда плазменного катода. Таким образом, в экспериментах был зарегистрирован „дополнительный“ ток, величина которого была сравнима с величиной тока разряда, а в некоторых случаях превышала ее. Калориметрические измерения интегральной энергии пучка на коллекторе показали, что увеличение тока в ускоряющем промежутке сопровождается пропорциональным увеличением энергии. Было сделано предположение, что механизм увеличения эмиссии может быть связан с вторичной ионно-электронной эмиссией с поверхности эмиссионного электрода под действием ионов, генерируемых пучком в пространстве дрейфа и ускоренных в слое пространственного заряда между границей пучковой (анодной) плазмы и эмиссионным электродом до энергии, соответствующей приложенному ускоряющему напряжению. Для проверки данного предположения были выполнены эксперименты, которые позволили оценить вклад вторичной ионно-электронной эмиссии в ток электронного пучка.

На рис. 1 представлена схема электронного источника. Плазменный катод представляет собой газоразрядную систему с двухступенчатым дуговым разрядом низкого давления. Иницирующий (поджигающий) разряд загорается между полым электродом 1, помещенным в поле постоянных магнитов, и катодом 2 при приложении импульса напряжения  $U_{trig}$  величиной 12–15 кВ. Амплитуда тока поджигающего разряда  $I_{trig} \sim 10$ –15 А при длительности импульса 25  $\mu$ s. Основной дуговой разряд горит между катодом 2 и полым анодом 3. Постоянное ускоряющее напряжение  $U_{ac} \sim 15$  кВ прикладывается между плоским эмиссионным электродом 5 и извлекающим электродом 6, выполненным в виде диафрагмы с отверстием  $\varnothing 82$  мм. Извлекающий электрод, труба дрейфа 7 и коллектор 8 находятся под потенциалом „земли“. Эмиссионный электрод представляет собой диск  $\varnothing 82$  мм (нержавеющая сталь) с

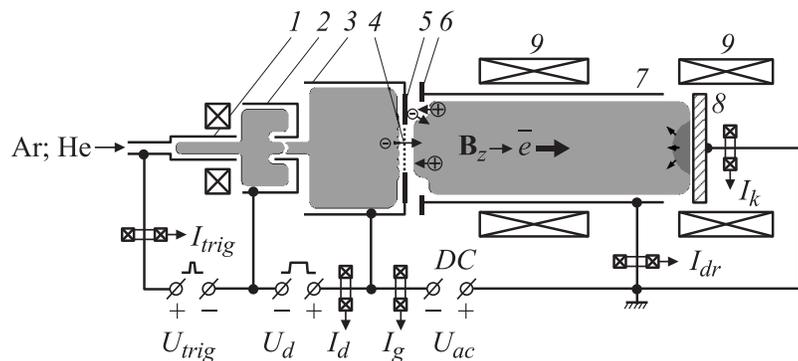


Рис. 1. Схема электронного источника.

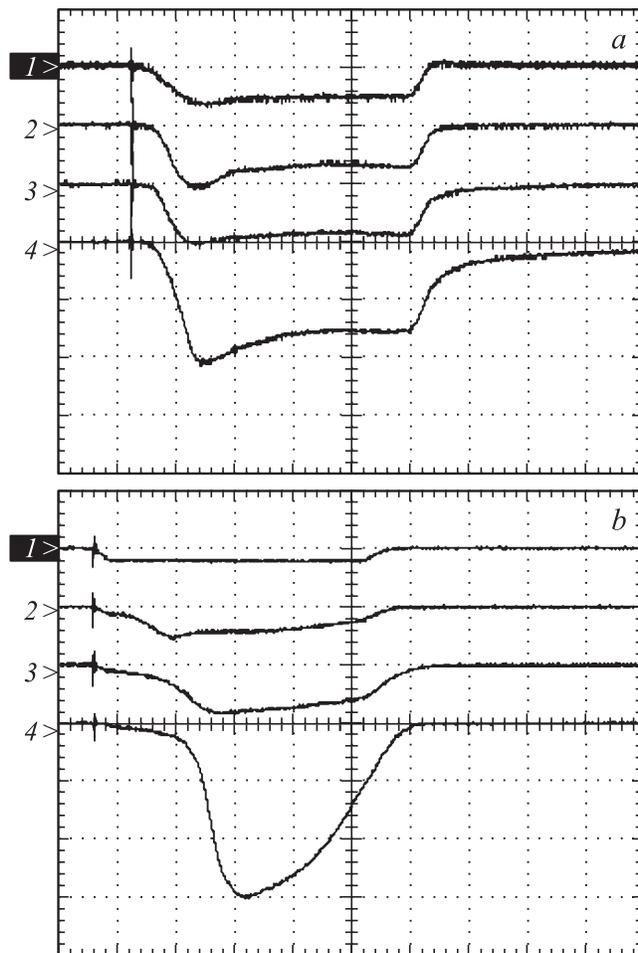
эмиссионным отверстием  $\varnothing 40$  mm в центре. Эмиссионное отверстие закрывалось мелкоструктурной сеткой из нержавеющей стали 4 с размером ячейки  $0.3 \times 0.3$  mm и прозрачностью 50%. Извлечение электронов из плазмы под действием ускоряющего напряжения происходит с центральной части эмиссионного электрода через ячейки эмиссионной сетки. Граница катодной плазмы стабилизируется сеткой, а граница анодной плазмы, создаваемой электронным пучком в пространстве дрейфа, остается подвижной. Электроны пучка транспортируются к коллектору в магнитном поле двух катушек 9, величина поля в которых в представленных экспериментах составляла 30 мТ. Длительность импульса тока пучка  $\tau = 100 \mu\text{s}$  задавалась длительностью импульса тока основного разряда. В качестве рабочего газа использовались аргон и гелий. Давление газа в рабочей камере варьировалось в диапазоне  $0.5 \cdot 10^{-2} - 2.5 \cdot 10^{-1}$  Pa. Так как напуск газа осуществлялся в электронный источник, реальное давление области транспортировки электронного пучка было выше, причем в области эмиссионной сетки оно превышало измеренные значения (рабочее давление) в  $\sim 4-5$  раз. В качестве датчиков тока использовались пояса Роговского. Ускоряющее напряжение измерялось с помощью резистивного делителя напряжения.

Первый эксперимент заключался в том, что отверстие диафрагмы в извлекающем электроде 6 (рис. 1) было уменьшено с  $\varnothing 82$  до  $\varnothing 40$  mm,

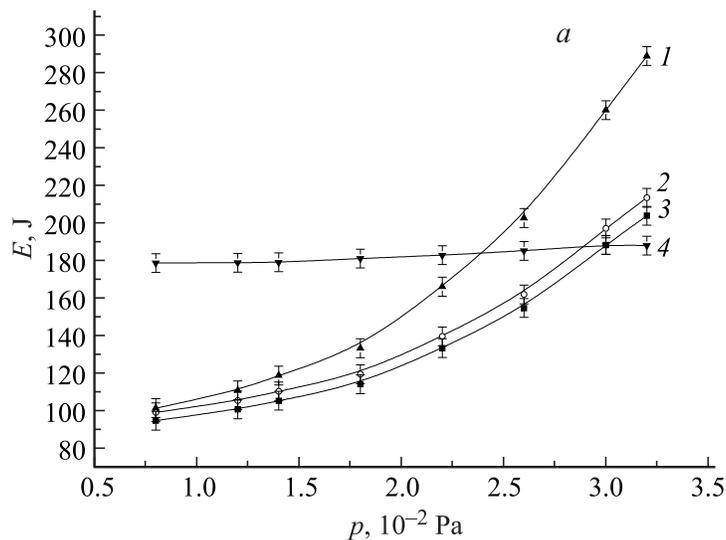
для того чтобы ионы из анодной плазмы, созданной пучком в трубе дрейфа, экранировались и не попадали на плоскую часть эмиссионного электрода. Для обратного ионного потока оставалась открытой только площадь эмиссионного отверстия, перекрытого сеткой. Амплитуда тока разряда составляла  $I_d = 100$  А, ускоряющее напряжение  $U_{ac} = 15$  кВ, рабочее давление  $p_{Ar} = 3 \cdot 10^{-2}$  Па, внешнее аксиальное магнитное поле  $B_z = 30$  мТ. В результате при установке диафрагмы  $\varnothing 40$  мм амплитуда тока в ускоряющем промежутке уменьшилась со 120 до 80 А. Наиболее вероятным представляется, что существенное усиление тока в отсутствие диафрагмы связано с увеличением обратного ионного тока и возникновением вторичного электронного тока с плоской части эмиссионного электрода.

Следующий эксперимент был выполнен с целью проверки влияния материала эмиссионного электрода на усиление эмиссии. Плоская часть эмиссионного электрода была изготовлена из трех материалов с различными коэффициентами вторичной ионно-электронной эмиссии: меди, нержавеющей стали и алюминия. В качестве рабочего газа использовались аргон и гелий. Сравнивался ток в ускоряющем промежутке при одинаковых заданных значениях тока разряда, рабочего давления, магнитного поля и ускоряющего напряжения. Результаты эксперимента показаны на рис. 2. Так же как и в предыдущем эксперименте, плоская часть эмиссионного электрода дает значительный вклад в увеличение тока в ускоряющем промежутке, причем видно, что для различных материалов величина этого вклада разная. Амплитуда тока в ускоряющем промежутке имеет наименьшее значение для меди, возрастает для нержавеющей стали и еще более возрастает для алюминия. Эти результаты качественно согласуются с литературными данными. В [4] представлены зависимости коэффициентов вторичной ионно-электронной эмиссии от энергии ионов  $He^+$  для различных материалов мишени. По данным [4], коэффициенты вторичной ионно-электронной эмиссии при бомбардировке ионами  $He^+$  с энергией 15 keV составляют для Cu  $\sim 1.5$ , для Fe  $\sim 3$  и для Al  $\sim 5.5$ .

Для количественной оценки вклада ионно-электронной эмиссии в увеличение тока и энергии электронного пучка были проведены калориметрические измерения интегральной энергии пучка на коллекторе и трубе дрейфа в зависимости от рабочего давления газа. Пучок транспортировался во внешнем аксиальном магнитном поле  $B_z = 30$  мТ. Измерения проводились при фиксированной амплитуде тока разряда



**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов тока: тока разряда  $I_d = 50$  А ( $I$ ) и тока в ускоряющем промежутке  $I_g$  (2–4) для различных материалов плоской части эмиссионного электрода — меди (2), нержавеющей стали (3), алюминия (4). Ускоряющее напряжение  $U_{ac} = 15$  кВ, магнитное поле  $B_z = 30$  мТ.  $a$  —  $p_{Ar} = 3 \cdot 10^{-2}$  Па, 100 А/див, 25  $\mu$ s/див;  $b$  —  $p_{He} = 2.5 \cdot 10^{-1}$  Па, 200 А/див, 25  $\mu$ s/див.



**Рис. 3.** *a* — энергия, рассчитанная по осциллограммам тока и напряжения в ускоряющем промежутке (1), суммарная интегральная энергия, измеренная на коллекторе и трубе дрейфа (2), энергия, измеренная на коллекторе (3), и уровень энергии при условии 100% извлечения электронов (энергия, рассчитанная по осциллограммам тока разряда и ускоряющего напряжения) (4) в зависимости от давления в рабочей камере. *b* — общий ток в ускоряющем промежутке (1), ток полной эмиссии (2), ток разряда (3) и обратный ионный ток (4) в зависимости от давления в рабочей камере.  $I_d = 100 \text{ A}$ ,  $U_{ac} = 15 \text{ kV}$ ,  $B_z = 30 \text{ mT}$ .

$I_d = 100 \text{ A}$ . Ток разряда, ток в ускоряющем промежутке и ускоряющее напряжение регистрировались с помощью цифрового осциллографа одновременно с калориметрическими измерениями в каждом импульсе. Измерения показали, что во внешнем магнитном поле  $B_z = 30 \text{ mT}$  электронный пучок практически полностью транспортируется к коллектору и токовые потери на трубу дрейфа составляют не более 5%. На рис. 3, *a* представлены зависимости энергии, рассчитанной по осциллограммам ускоряющего напряжения и тока в ускоряющем промежутке, и суммарной энергии, измеренной калориметрами на коллекторе и трубе дрейфа, от давления (кривые 1 и 2). Кривая 4 показывает уровень значений

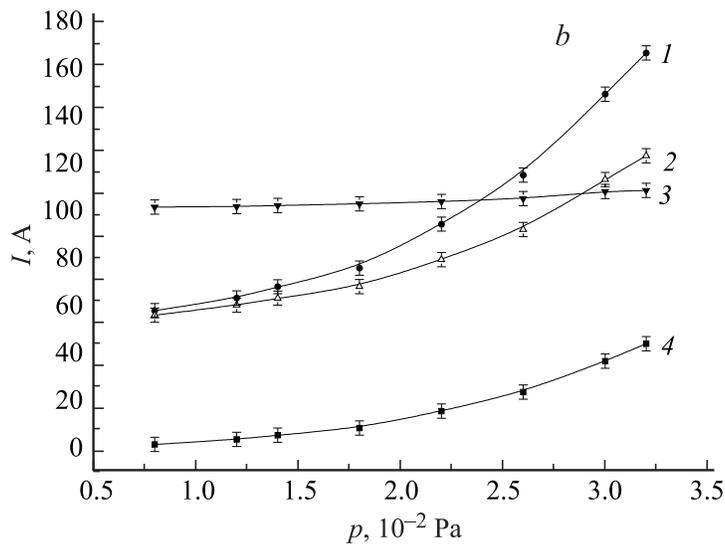


Рис. 3 (продолжение).

интегральной энергии пучка при условии 100% извлечения электронов из катодной плазмы (энергия, рассчитанная по осциллограммам тока разряда и ускоряющего напряжения). Видно, что с увеличением давления суммарная измеренная энергия плавно растет и начиная с  $p \sim 3 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$  измеренные значения интегральной энергии пучка превышают расчетные значения при условии 100% извлечения электронов из катодной плазмы. Предполагая наличие ионно-электронной эмиссии с поверхности эмиссионного электрода, регистрируемый общий ток в ускоряющем промежутке  $I_g$  можно представить как сумму токов

$$I_g = I_e + I_i + \gamma I_i, \quad (1)$$

где  $I_e$  — ток электронов, эмитированных из плазменного катода;  $I_i$  — обратный ток ионов из пространства трубы дрейфа на эмиссионный электрод;  $\gamma$  — эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии материала эмиссионного электрода. Энергия, рассчитанная по осцилло-

граммам тока и напряжения в ускоряющем промежутке, имеет вид

$$E_c = \int_0^{\tau} I_g(t) U_{ac}(t) dt = \int_0^{\tau} [I_e + I_i + \gamma I_i] U_{ac} dt, \quad (2)$$

где  $\tau$  — длительность импульса тока пучка. Суммарная интегральная энергия, измеренная калориметрами на коллекторе и трубе дрейфа, не включает в себя ионную компоненту:

$$E_b = \int_0^{\tau} I_b(t) U_{ac}(t) dt = \int_0^{\tau} [I_e + \gamma I_i] U_{ac} dt. \quad (3)$$

Энергию, приносимую низкоэнергетичными плазменными электронами и ионами на коллектор и трубу дрейфа, считаем пренебрежимо малой. Таким образом, из (2) и (3) можно оценить средний за импульс ионный ток в ускоряющем промежутке:

$$I_i = (E_c - E_b) / (U_{ac} \tau). \quad (4)$$

С увеличением рабочего давления увеличивается разница значений энергии между кривыми 1 и 2 (рис. 3, а). Это свидетельствует об увеличении обратного ионного тока в ускоряющем промежутке с ростом давления. Например, для точки, соответствующей рабочему давлению  $p = 3.2 \cdot 10^{-2}$  Па, средняя амплитуда ионного тока, оцененная по (4), составляет  $I_i = 44$  А. В то же время в области минимальных давлений  $p \leq 10^{-2}$  Па значения стремятся к точке, где соотношение энергии, рассчитанной по осциллограммам тока и напряжения в ускоряющем промежутке, и энергии, измеренной калориметрами, практически совпадает (доверительные интервалы измерений пересекаются), т. е. грубо можно считать, что обратный ионный ток на эмиссионный электрод отсутствует и общий ток в ускоряющем промежутке определяется током электронов, эмитированных плазменным катодом. В условиях эксперимента эта точка соответствует давлению  $p \sim 0.8 \cdot 10^{-2}$  Па. Ток электронов по амплитуде равен  $\sim 55$  А, и коэффициент извлечения электронов из плазменного катода можно оценить как 0.55 (рис. 3, б). Зная ток электронов, извлеченных из катодной плазмы, и обратный ионный ток на эмиссионный электрод, можно оценить эффективный

коэффициент  $\gamma$ . Для нержавеющей стали, бомбардируемой ионами аргона с энергией 15 keV, по результатам экспериментов он составил  $\gamma \sim 1.5$ . На рис. 3, *b* показаны зависимости измеренных тока разряда и общего тока в ускоряющем промежутке, а также рассчитанных по вышеописанной методике обратного ионного тока и тока полной эмиссии электронов в зависимости от рабочего давления.

Полученные экспериментальные данные и оценки позволяют предложить следующий механизм, объясняющий эффект усиления эмиссии в диоде с плазменным катодом и открытой границей анодной плазмы. Импульсный электронный пучок, генерируемый в газонаполненном диоде и транспортируемый в трубе дрейфа, помещенной в аксиальное магнитное поле, создает интенсивную плазму. Ионы, образующиеся в пространстве дрейфа и ускоренные, в слое пространственного заряда между границей пучковой (анодной) плазмы и эмиссионным электродом до энергии, соответствующей приложенному ускоряющему напряжению (15 ~ 20 keV), попадают на металлическую поверхность эмиссионного электрода и выбивают вторичные электроны, которые также ускоряются. Таким образом, ток пучка ускоренных электронов представляет собой сумму тока электронов, извлеченных из газоразрядной плазмы, генерируемой дуговым разрядом в электродной системе плазменного катода и тока вторичной ионно-электронной эмиссии с металлической поверхности эмиссионного электрода. Этот эффект не только следует учитывать при проведении экспериментов, но и можно целенаправленно использовать для повышения эффективности плазменных источников электронов.

Работа выполнена при поддержке грантами РФФИ 08-08-92207 ГФЕН\_а и 09-02-90456 Укр\_ф\_а, грантом программы президиума РАН № 30 и интеграционными проектами СО РАН № 34, 42.

## Список литературы

- [1] Коваль Н.Н., Щанин П.М., Девятков В.Н. и др. // ПТЭ. 2005. В. 1. С. 135.
- [2] Ivanov Yu.F., Kolubaeva Yu.A., Teresov A.D. et al. // Proc. 9th Int. Conf. Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk, Russia, 2008. P. 143.
- [3] Крейндель Ю.Е. Плазменные источники электронов. М.: Атомиздат, 1977. 144 с.
- [4] Кикоин И.К. Таблицы физических величин. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.