

12

Распределение плотности тока в пучке большого сечения в ускорителе электронов с многоапертурным плазменным катодом

© М.С. Воробьев, Н.Н. Коваль

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск
E-mail: vorobyovms@yandex.ru

Поступило в Редакцию 27 января 2016 г.

Описан ускоритель электронов с многоапертурным плазменным катодом с точной стабилизацией границы эмиссионной плазмы на основе дугового разряда низкого давления, генерирующий пучок большого сечения ($750 \times 150 \text{ mm}^2$) с выводом его в атмосферу или газ высокого давления через выпускное фольговое окно. Предложен и экспериментально проверен сравнительно простой способ уменьшения неоднородности распределения плотности тока по сечению пучка путем использования маски с переменным диаметром отверстий. В этом случае диаметр отверстий в маске тем меньше, чем выше концентрация плазмы в области эмиссии. При использовании такой маски неоднородность распределения плотности тока была уменьшена с ± 15 и $\pm 10\%$ до ± 10 и $\pm 5\%$ по длинной и короткой сторонам сечения пучка соответственно.

Пучки большого сечения, выведенные в атмосферу или газ высокого давления через выпускные фольговые окна, находят широкое применение как в научных исследованиях, так и для технологических целей [1–3]. При этом вне зависимости от типа применяемого катода огромное внимание уделяется распределению плотности тока по сечению пучка, стремясь в большинстве случаев к ее выравниванию.

Низкий срок службы накаливаемых катодов, сложность конструкций ускорителей электронов на их основе, зависимость распределения плотности тока пучка от магнитного поля тока накала, отсутствие синхронизации тока накала с нулевой фазой и неэквипотенциальность катода могут существенно ухудшать распределение плотности тока пучка в ускорителях электронов на основе термоэлектронной эмиссии [4].

Значительной неоднородностью распределения плотности тока по сечению пучка обладают ускорители электронов на основе взрывной эмиссии электронов, особенно при низкоперевансном режиме работы с низкими ускоряющими напряжениями, позволяющими работать в микросекундном диапазоне длительности импульсов. Низкоперевансный режим работы приводит к уменьшению напряженности электрического поля на микроостриях катодов и нестабильностям их срабатываний. При этом распределение плотности тока по сечению пучка меняется с каждым последующим импульсом. Параллельной работы всех острий в таком катоде достигают либо путем использования для эмиттеров материалов с малым пороговым током дуги (С, Hg, LaB₆ и др.) [5], либо установкой в цепь каждого эмиттера ограничительного сопротивления, что также усложняет конструкцию ускорителей электронов [6].

В ускорителях электронов с плазменными эмиттерами на основе дугового либо тлеющего разрядов низкого давления, эмиссионная граница плазмы в которых стабилизирована мелкоструктурной металлической сеткой, при генерации пучков большого сечения используют переменную прозрачность эмиссионной сетки путем укладывания на сетку с мелкой ячейкой другой сетки с большим размером ячейки [7]. Кроме этого, при использовании в плазменном эмиттере двух катодных узлов на основе дуги низкого давления, синхронно работающих на общую анодную полость, управление распределением плотности тока возможно путем изменения угла наклона осей катодных узлов относительно продольной оси полого анода [8]. Совокупность таких методов позволяет уменьшить неравномерность плотности тока по сечению пучка до значения не выше $\pm 5\%$ от средней плотности тока пучка.

В данной работе исследовалось распределение плотности тока по сечению пучка с использованием многоапертурной системы извлечения электронов из плазменного эмиттера на основе дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы [9]. Схема такого источника представлена на рис. 1. В двухэлектродной многоапертурной электронно-оптической системе отверстия в маске 6, выполненной из нержавеющей стали толщиной $200\ \mu\text{m}$ и уложенной на эмиссионную сетку 5, выполнены меньшего диаметра (8–10 mm), чем отверстия в опорной решетке 8 выпускного фольгового окна, диаметр которых был постоянен и равен 15 mm.

В такой электродной системе в атмосферу через выпускное фольговое окно с геометрической прозрачностью 56% было выведено

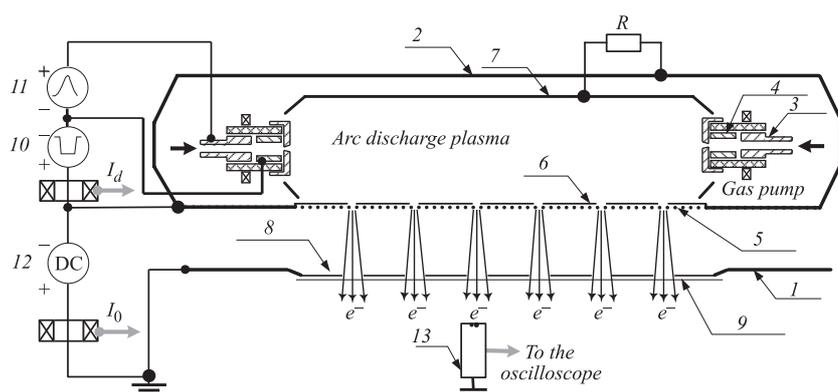


Рис. 1. Схема широкоапертурного электронного источника: 1 — вакуумная камера, 2 — плазменный эмиттер, 3 — поджигающий электрод, 4 — катод, 5 — эмиссионная сетка, 6 — маска, 7 — полый анод, 8 — опорная решетка, 9 — выводная фольга, 10 — источник электропитания разряда, 11 — источник электропитания поджига, 12 — высоковольтный источник электропитания, 13 — калориметр ТПИ-2М.1.

около 75% от тока в ускоряющем промежутке I_0 и более 60% от мощности пучка в этом промежутке. Так, при ускоряющем напряжении $U_0 = 200 \text{ kV}$, токе в ускоряющем промежутке $I_0 = 16 \text{ A}$, длительности импульса $t = 40 \mu\text{s}$, частоте следования импульсов $f = 50 \text{ s}^{-1}$ и средней мощности пучка в ускоряющем промежутке около $P_0 = 6.4 \text{ kW}$ из ускоряющего промежутка в атмосферу было выведено $P_b \approx 4 \text{ kW}$ средней мощности пучка.

Исследования распределения плотности тока по сечению пучка проводились по фиксации отпечатков электронного пучка на органическом полимере (винипрозе), установленном в вакууме и чувствительном к воздействию электронного пучка. Лист винипроза размером $750 \times 150 \text{ mm}$ устанавливался на водоохлаждаемую заглушку, играющую роль анода ускоряющего высоковольтного зазора. Отпечаток генерируемого электронного пучка с установленной в эмиттер маской с отверстиями диаметром 8 mm , уложенной на сетку с размером ячейки $0.6 \times 0.6 \text{ mm}$, представлен на рис. 2. Количественная оценка распределения плотности тока по сечению пучка осуществлялась при

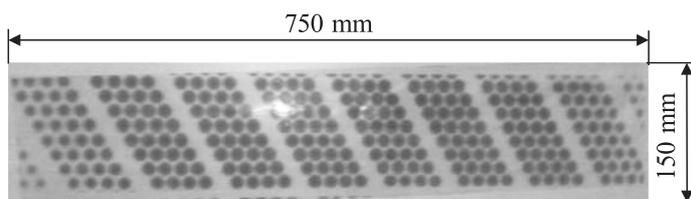


Рис. 2. Отпечаток электронного пучка на полимере.

фотометрировании отпечатка пучка, считая, что потемнение винипроза пропорционально плотности тока пучка, что было установлено в предварительных экспериментах. Для фотометрирования использовался люксметр Light meter AZ instrument 8581. Для подтверждения данных о распределении плотности тока по сечению пучка, полученных в вакуумном ускоряющем промежутке, в атмосфере проводились калориметрические измерения распределения плотности энергии электронного пучка. Такие измерения осуществлялись с помощью стандартного калориметрического преобразователя ТПИ-2М.1 с площадью чувствительного элемента 36 cm^2 и чувствительностью $K = 1 \cdot 10^{-4} \text{ V/J}$. Калориметр устанавливался на расстоянии 20 mm от выводной фольги источника электронов и перемещался по продольной и поперечной сторонам выпускного фольгового окна. Сигнал с калориметра, пропорциональный энергии попадающего на него пучка, выводился на осциллограф Tektronix TDS 2014. Результаты измерений представлены на рис. 3.

Из рис. 3 (кривые 2, 3) видно, что, как и в работе [10], распределение плотности тока по сечению пучка имеет в центральной части локальные минимумы и максимумы по продольной и поперечной сторонам сечения пучка соответственно. Было установлено, что использование в маске отверстий малого диаметра (8 mm) при размере ячейки эмиссионной сетки $0.6 \times 0.6 \text{ mm}$ позволяет организовать стабильную работу электронного источника в широком диапазоне изменения его параметров. Это связано с переключением тока разряда в ячейки эмиссионной сетки так, что коэффициент извлечения тока из эмиттера в ускоряющий промежуток превышает геометрическую прозрачность эмиссионного электрода.

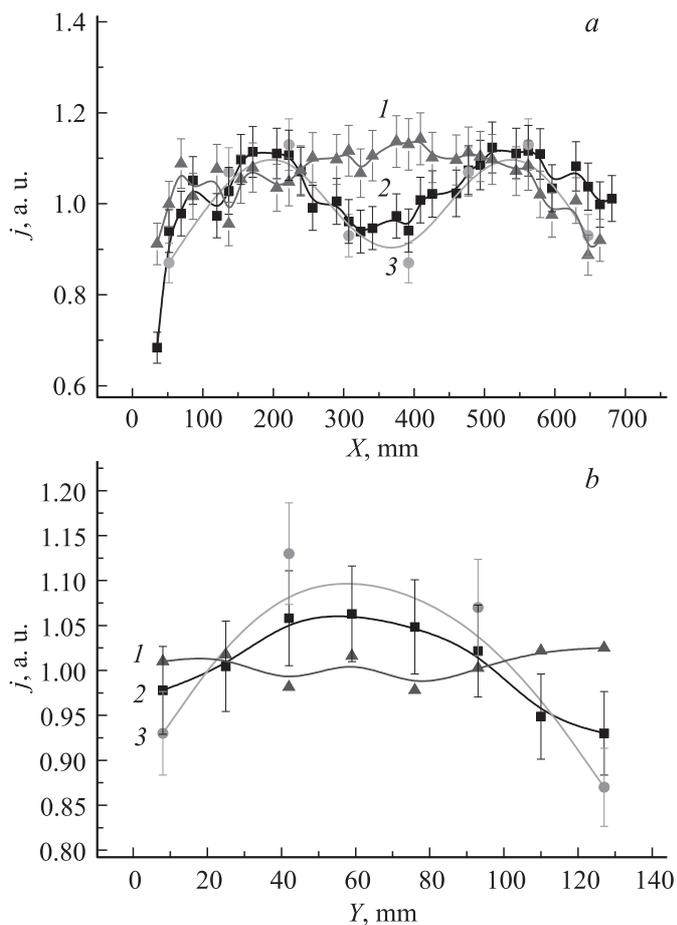


Рис. 3. Распределения плотности тока по длинной (*a*) и короткой (*b*) сторонам сечения пучка, полученные на ускорителе электронов с многоапертурным плазменным катодом: 1 — фотометрирование винипроза при использовании маски с переменной прозрачностью; 2 — фотометрирование винипроза при использовании маски с постоянной прозрачностью; 3 — измерения калориметром ТПИ-2М.1 при использовании маски с постоянной прозрачностью.

Эффект переключения тока разряда в ячейки эмиссионной сетки можно рационально использовать для интегрального перераспределения плотности тока разряда, что достигается путем введения в плазменный эмиттер маски с переменной прозрачностью. В проведенных экспериментах для выравнивания плотности тока пучка по его сечению маска была выполнена с отверстиями различного диаметра 8–12 mm: увеличенного до 12 mm диаметра в областях с минимальной плотностью тока и уменьшенного до 8 mm диаметра в областях с максимальной плотностью тока.

Распределение плотности тока по сечению пучка, полученное в этом случае, представлено на рис. 3 (кривая 1). Видно, что увеличение отверстий в маске приводит к увеличению плотности тока по сечению пучка в местах с минимальной плотностью и уменьшению — на участках, где плотность тока была максимальна.

Такой способ выравнивания плотности тока по сечению пучка перспективен для применения в источниках электронов с плазменным катодом, генерирующих пучки площадью в тысячи квадратных сантиметров. Созданный на этой основе ускоритель электронов использовался в экспериментах по вулканизации натурального латекса для создания тонкослойной резины [11], а также для радиационно-стимулированного разложения тетрафторида кремния под действием импульсного электронного пучка [12].

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00091).

Список литературы

- [1] Бугаев С.П., Крейндель Ю.Е., Шанин П.М. Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
- [2] Хенце М. Очистка сточных вод. М: Мир, 2004. 471 с.
- [3] Соковнин С.Ю. // Наносекундные ускорители электронов и радиационные технологии на их основе. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 224 с.
- [4] Аброян М.А., Косоголов С.Л., Набокова И.В., Успенский Н.А., Чумисев В.А., Шапиро В.Б., Шведюк В.Я. // ПТЭ. 2007. № 4. С. 109–112.
- [5] Баженов Г.П., Чесноков С.М. // Известия вузов. Физика. 1976. № 11. С. 133–134.
- [6] Бурцев В.А., Василевский М.А., Ройфе И.М., Середенко Е.В., Энгелько В.И. // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 14. В. 18. С. 1083–1087.

- [7] *Gielkens S.W.A., Peters P.J.M., Witteman W.J., Borovikov P.V., Stepanov A.V., Tskhai V.N., Zavjalov M.A., Gushenets V.I., Koval N.N.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1996. V. 67. N 7. P. 2449–2452.
- [8] *Schanin P.M., Koval N.N., Tolkachev V.S., Gushenets V.I.* // *Russian Phys. J.* 2000. V. 43. N 5. P. 427–431.
- [9] *Воробьев М.С., Коваль Н.Н., Сулакишин С.А.* // *ПТЭ.* 2015. № 5. С. 112–120.
- [10] *Koval N.N., Kreindel Yu.E., Tolkachev V.S., Schanin P.M.* // *IEEE Trans. Electrical Insulation.* 1985. V EI-20. N 4. P. 735–737.
- [11] *Воробьев М.С., Денисов В.В., Коваль Н.Н., Шугуров В.В., Яковлев В.В., Уетира К., Рахаржо Р.* // *Химия высоких энергий.* 2015. Т. 49. № 3. С. 169–172.
- [12] *Koval N.N., Shugurov V.V., Suslov A.I., Denisov V.V., Yakovlev V.V., Vorobyov M.S., Khandorin G.P., Ledovskikh A.K., Galata A.A., Murlyshev A.P., Volchkov V.S.* // *Proc. 10th Intern. Conf. on Modif. of Materials with Particle Beams and Plasma Flows.* Tomsk, 2010. P. 687–690.