

ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ С СЕТОЧНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ РАДИАЛЬНО СХОДЯЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

М.С. Торба, С.Ю. Дорошкевич, М.С. Воробьев,
А.А. Гришков, Н.Н. Коваль, М.Г. Волис
Институт сильноточной электроники СО РАН,
пр. Академический 2/3, Томск 634055, Россия, mtorba9@gmail.com,
doroshkevich096@gmail.com, vorobyovms@yandex.ru, grishkov@to.hcei.tsc.ru,
koval@hcei.tsc.ru, volis.maks@mail.ru

Представлены результаты исследований по генерации радиально сходящегося электронного пучка в источнике с многодуговым сеточным плазменным эмиттером. Проведены эксперименты, ориентированные на повышение амплитуды тока радиально сходящегося пучка и увеличения стабильности работы источника (уменьшение количества пробоев). Проведена серия коллекторных измерений с использованием секционированного коллектора из нержавеющей стали для измерения плотности и распределения тока радиально сходящегося электронного пучка в различных режимах. Результаты, полученные при проведении серии коллекторных измерений, выявили недостатки в используемой конфигурации плазменного эмиттера и способствовали проведению его модернизации. Использование секционированного полого анода позволило снизить неоднородность радиально сходящегося электронного пучка. Приведены сравнения распределения плотности тока радиально сходящегося электронного пучка при различных конфигурациях плазменного эмиттера.

Ключевые слова: дуговой разряд; плазменный эмиттер; полый анод; радиально сходящийся электронный пучок; модификация материалов.

ELECTRON SOURCE WITH A GRID PLASMA EMITTER FOR GENERATION OF A RADIALLY CONVERGING ELECTRON BEAM

M.S. Torba, S.Yu. Doroshkevich, M.S. Vorobyov,
A.A. Grishkov, N.N. Koval, M.G. Volis
Institute of High-Current Electronics SB RAS,
2/3 Akademicheskoy Ave., 634055 Tomsk, Russia,
mtorba9@gmail.com, doroshkevich096@gmail.com, vorobyovms@yandex.ru,
grishkov@to.hcei.tsc.ru, koval@hcei.tsc.ru, volis.maks@mail.ru

The article presents the results of studies on the generation of a radially converging electron beam in a source with a grid plasma emitter. Experiments were conducted to change the cell sizes of the emission grid in the grid plasma emitter (0.4×0.4 mm and 0.14×0.14 mm) in order to increase the amplitude of the current of the radially converging beam while maintaining the stability of the source. The results of the experiments showed a significant increase in the current in the accelerating gap. The dependences of the current in the accelerating gap on the accelerating voltage at different pressures of the working gas were constructed. After processing the results, it can be said that the use of an emission grid with a 0.4×0.4 mm cell is not optimal due to the deep penetration of the field from the accelerating gap into the emission region, while the constant selection of electrons does not allow the full use of the hollow anode effect for producing emission plasma. A series of collector measurements were performed using a sectioned stainless steel collector to measure the density and current distribution of a radially converging electron beam at a working gas pressure of $p = 4 \times 10^{-2}$ Pa and a beam current of $I_b = 20$ A. The results obtained during a series of collector measurements revealed shortcomings in the used plasma emitter configuration and contributed to its modernization. The arrangement of the cathode units was changed. If previously they were located 3 on each side at the ends of the plasma emitter, then in the modernized plasma emitter they are all located on one side and spaced by 60 degrees. Comparisons of the current density distribution of a radially converging electron beam are given for various plasma emitter configurations.

Keywords: arc discharge; plasma emitter; hollow anode; radially converging electron beam; modification of materials.

Введение

Одним из направлений обработки поверхности металлических и металлокерамических материалов является модификация поверхностного слоя материала пучком электронов [1, 2]. Однако возможность использования планарных электронных пучков снижается, когда требуется обработать изделие цилиндрической формы. В частности, стоит отметить появление эффекта геометрической тени, который не позволяет обработать некоторые участки изделия цилиндрической формы с развитой поверхностью (например, коронарные стенты).

Целью данной работы является создание источника, который способен генерировать радиально сходящийся электронный пучок и проводить всестороннюю обработку изделий цилиндрической формы с удовлетворительным качеством.

Эксперимент и обсуждение результатов

Схема источника представлена на рис. 1.

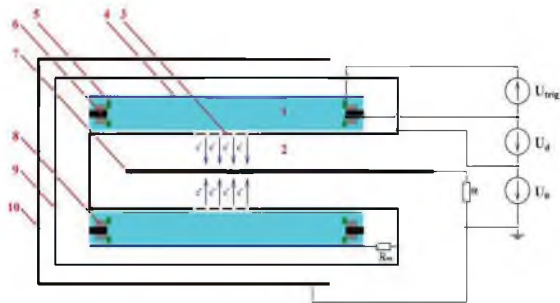


Рис. 1. Схема источника электронов: 1 – эмиссионная плазма, 2 – ускоряющий промежуток, 3 – мелкоструктурная эмиссионная сетка, 4 – полый анод, 5 – поджигающий электрод, 6 – катод, 7 – коллектор, 8 – анод, 9 – плазменный эмиттер, 10 – вакуумная камера

Инициирование дугового разряда пробоем по поверхности диэлектрика в каждом из шести катодных узлов, расположенных на торцах плазменного эмиттера, выполненного в виде полого протяженного тороида, приводит к зажиганию объемного дугового разряда низкого давления в его пространстве. Общим анодом дугового разряда в представленной системе явля-

ются внутренние стенки плазменного эмиттера 9, эмиссионная сетка 3 и полый анод 4. Последний устанавливается в систему через сопротивление $R_{HA} = 250 \text{ Ом}$ для ускорения процесса переключения электронов в область эмиссионной сетки и повышения коэффициента извлечения электронов из эмиттера.

В первых экспериментах была использована эмиссионная сетка с размером ячейки $0.4 \times 0.4 \text{ мм}$, однако результаты экспериментов показали, что полученных значений тока пучка недостаточно для проведения модификации поверхности [3].

Слабая зависимость тока в ускоряющем промежутке от ускоряющего напряжения была обусловлена сильным проникновением электрического поля из ускоряющего промежутка внутрь эмиссионной области, в результате которого из плазмы происходил отбор быстрых электронов, энергия которых достаточна для ионизации рабочего газа, и плазма дугового разряда не успевала нарабатываться. Стоит отметить, что ток в ускоряющем промежутке возрастал при увеличении рабочего давления, что связано с ростом числа актов ионизации в плазменном эмиттере и увеличением концентрации эмиссионной плазмы.

Использование более мелкой сетки с ячейкой $0.14 \times 0.14 \text{ мм}$ позволило увеличить ток в ускоряющем промежутке и снизить число его электрических пробоев.

Проведение коллекторных измерений при помощи секционированного коллектора из нержавеющей стали позволило обнаружить высокую неоднородность пучка (рис. 2а), связанную с локальным замыканием тока на коллектор, из-за чего происходило его локальное оплавление и дальнейшее развитие дестабилизирующих эффектов, приводящих к росту неоднородности тока пучка и электрическим пробоям промежутка.

Использование секционированного полого анода позволило избавиться от перечисленных выше негативных эффектов и уменьшить неоднородность плотности тока радиально сходящегося пучка с 60%

до 10% (рис. 2б).

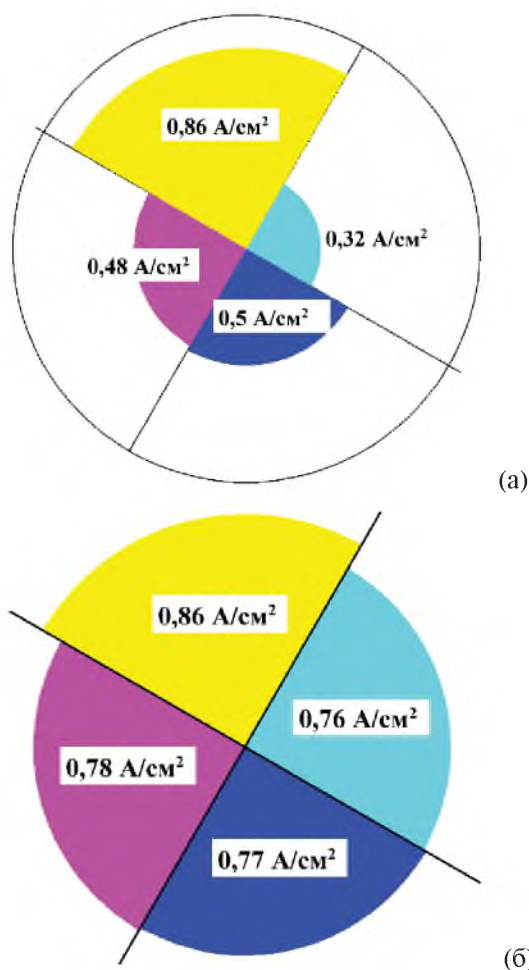


Рис. 2. Результаты коллекторных измерений: а – сплошной полый анод, б – секционированный полым анодом ($p = 4 \times 10^{-2}$ Па)

Заключение

Создан источник электронов, способный генерировать радиально сходящийся электронный пучок с током до 50 А, длительностью импульса до 500 мкс и энер-

гией электронов до 50 кэВ. При этом плотность энергии на цилиндрическом коллекторе диаметром 16 мм составила около 15 Дж/см^2 , а неоднородность плотности тока генерируемого пучка составляет $\pm 10\%$, что делает его пригодным для использования в научных и технологических целях, а именно, для оплавления поверхности сталей и сплавов, приводящей к выглаживанию (электронно-пучковая полировка) и увеличению ее прочности путем закалки из расплава при сверхбыстром охлаждении за счет теплопроводности вглубь материала.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-19-00405).

Библиографические ссылки

1. Ротштейн В.П., Проскуровский Д.И., Озур Г.Е., Иванов Ю.Ф. Модификация поверхностных слоев металлических материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками. Новосибирск: Наука, 2019.
2. Энгелько В.И., Павлов Е.П., Ткаченко К.И., Щеголихин Н.П. Установка ГЕЗА-4М для электронно-пучковой модификации поверхности оболочек ТВЭЛов РУ С ТЖМТ. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы 2019; (1): 67-74.
3. Торба М.С., Дорошкевич С.Ю., Воробьев М.С., Коваль Н.Н., Ежов В.В., Сулакшин С.А., Картавцов Р.А. Генерация радиально сходящегося электронного пучка в источнике с многодуговым сеточным плазменным катодом. Труды VII международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника». Улан-Удэ: Издательство Бурятского научного центра СО РАН, 2023: 42-49.