

## ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ С МНОГОДУГОВЫМ ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

М.С. Воробьев<sup>1)</sup>, В.Н. Девятков<sup>1)</sup>, Н.Н. Коваль<sup>1, 2)</sup>,  
Т.В. Коваль<sup>2)</sup>, Нгуен Вао Хынг<sup>2)</sup>, С.А. Сулакшин<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН,  
пр. Академический 2/3, Томск, 634055, Россия

<sup>2)</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
пр. Ленина, 30, Томск, 634050, Россия

vorobyovms@yandex.ru, vlad@opee.hcei.tsc.ru, koval@opee.hcei.tsc.ru,  
tvkoval@mail.ru, baohung.ng@gmail.com, sulakshinsa@yandex.ru

Источник электронов с сеточным плазменным катодом на основе многодугового разряда низкого давления (10-40 мПа) с длительностью импульсов тока пучка в сотни микросекунд предназначен для исследований воздействия плотных пучков на материалы и изделия. Под действием постоянного ускоряющего напряжения до 90 кВ, приложенного между сеточным плазменным катодом и ускоряющим электродом, совмещенным с трубой дрейфа длиной 750 мм, происходит извлечение электронов из плазмы. Показано, что в рассматриваемой системе предельные параметры электронного пучка ограничены суммарной его энергией на уровне около 5 кДж, при превышении которой происходит электрический пробой ускоряющего промежутка. Поиску оптимального диапазона параметров, при которых пучок обладает максимальными параметрами при транспортировке и выявлению механизма электрического пробоя высоковольтного ускоряющего промежутка посвящена данная работа.

В Институте сильноточной электроники СО РАН ведутся работы по созданию источника электронов с сеточным плазменным катодом на основе многодугового разряда низкого давления (10-40 мПа) с длительностью импульсов тока пучка в сотни микросекунд, предназначенного для исследований по воздействию плотных пучков на материалы и изделия. Эмитирующая электроны плазма генерировалась с помощью шести электродуговых плазмодогенераторов, расположенных в плазменном катоде диаметром 800 мм и длиной 180 мм с эмиссионным сеточным окном диаметром 140 мм. Под действием постоянного ускоряющего напряжения до 90 кВ, приложенного между плазменным катодом с сеточной стабилизацией границы плазмы и ускоряющим электродом, совмещенным с трубой дрейфа длиной 750 мм, происходит извлечение электронов из плазмы и их ускорение до энергии, соответствующей приложенному напряжению. Эксперименты проводились как без внешнего магнитного поля, так и в продольном ведущем магнитном поле, формируемом системой из системы катушек, размещенных в области дрейфа пучка (рис. 1).

Основной проблемой, возникающей при генерации интенсивных электронных пучков, является электрический пробой ускоряющего промежутка, который ограничивает рабочий диапазон ускоряющих напряжений. Уменьшение концентрации пучковой плазмы приводит не только к уменьшению тока коллектора, но и к смене полярности тока коллектора на переднем фронте импульса тока разряда за счет ионного тока на коллектор и ионно-электронной эмиссии с его поверхности. С увеличением ускоряющего напряжения увеличивается время формирования плазменного канала и плотность газа, десорбированного с поверхности коллектора, что наряду с увеличением коэффициента ионно-электронной эмиссии приводит к дальнейшему росту тока пучка и, как следствие,

пробой ускоряющего промежутка.

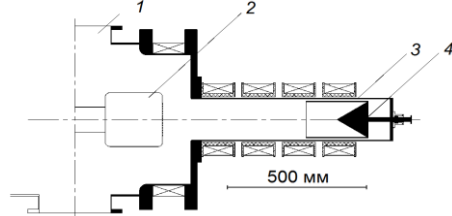


Рис. 1. Упрощенная схема источника электронов с сеточным плазменным катодом: 1 – вакуумная камера, 2 – плазменный эмиттер, 3 – труба дрейфа, 4 – цилиндр Фарадея.

Основные причины нестабильностей тока связаны с процессами, происходящими в двойном электрическом слое между разрядной и пучковой плазмой. Положение границы эмиссионной плазмы в ячейках сетки обеспечивает эффективную эмиссию электронов с открытой поверхности разрядной плазмы при выполнении равенства  $\varphi = U$  и замыкании основной части электронной компоненты тока разряда через ее ячейки в ускоряющий промежуток. Потенциал плазмы  $\varphi$  определяется из условия непрерывности тока в плазменном катоде в режиме эмиссии с открытой плазменной поверхности; потенциал  $U = CU_a^{1/4} I_b^{1/2}$  характеризует поле ускоряющего промежутка, проникающее в ячейки сетки,  $C = \text{const}$ ,  $I_b$  – ток пучка,  $U_a$  – ускоряющее напряжение. Если  $\varphi > U$ , то весь ток разряда замыкается в ускоряющий промежуток, что зачастую вызывает пробой ускоряющего промежутка.

В источнике без ведущего магнитного поля максимальное напряжение  $U_{cr}$  без пробоя ускоряющего промежутка падало с ростом тока пучка. Так, при давлении аргона 30 мПа и при токе коллектора 750 А напряжение пробоя  $U_{cr} = 20$  кВ.

При работе источника с магнитным полем ионы пучковой плазмы замыкаются на трубу дрейфа поперек линий ведущего магнитного поля,

величина ионного тока зависит от величины магнитного поля и ускоряющего напряжения. Электроны пучка и плазмы уходят на коллектор вдоль силовых линий ведущего магнитного поля. Оптимизированная конфигурация магнитного поля позволила стабилизировать электронный пучок с амплитудой тока до 1 кА при длительности 100 мкс на полувысоте при начальном ускоряющем напряжении 70 кВ, пучок транспортируется в продольном магнитном поле (350 Гс) на расстояние до 750 мм от эмиссионной сетки плазменного катода. На рис. 2 показаны характерные осциллограммы токов.

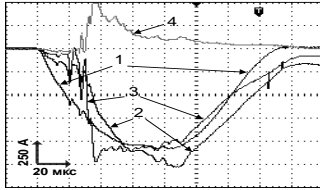


Рис. 2. Характерные осциллограммы токов: 1 – ток разряда; 2 – ток ускоряющего промежутка; 3 – ток коллектора; 4 – ток трубы дрейфа;  $U_a=70$  кВ,  $p=20$  мПа.

Как и в случае без магнитного поля, электрический пробой высоковольтного промежутка связан с достижением порогового значения ускоряющего напряжения  $U_{cr}$ , которое зависит от магнитного поля, давления газа и тока разряда. Так при давлении 40 мПа напряжение  $U_{cr}=90$  кВ достигается при токе разряда 500 А, при токе разряда  $I_p=1000$  А критическое напряжение составляет  $U_{cr}=50$  кВ. При давлении 20 мПа,  $U_{cr}=70$  кВ и  $I_p=1000$  А энергосбережение электронного пучка около 5 кДж.

Одной из особенностей источников электронов с плазменным сеточным катодом [1-3] является наличие диапазона параметров (плотность тока эмиссии единицы  $A/cm^2$ ,  $B=100-300$  Гс,  $p=15-40$  мПа), при котором источник работает в режиме усиления тока эмиссии благодаря ионно-электронной эмиссии с поверхности эмиссионного электрода. В рассматриваемом источнике при

$B=225$  Гс и давлении 40 мПа ток эмиссии электронов 600 А достигался при  $U_{cr}=60$  кВ при  $I_p=250$  А. Однако в этом режиме источник имеет значительную нестабильность тока и низкую электрическую прочность ускоряющего промежутка.

Численное моделирование методом крупных частиц показало, что токопрохождение пучка в пространстве дрейфа и распределение плотности тока пучка на коллекторе зависят от энергии и тока электронов пучка, величины и конфигурации ведущего магнитного поля, давления газа. Показано, что при формировании пучка формируется неоднородный плазменный канал, обуславливающий распределение плотности тока пучка на коллекторе с явно выраженным максимумом на оси симметрии пучка. На рис. 3 показаны отдельные траектории электронов.

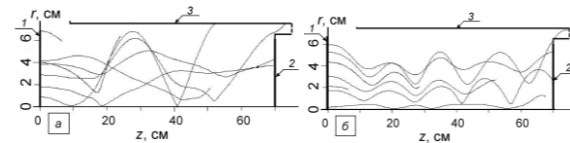


Рис. 3. Некоторые траектории электронов пучка в канале транспортировки, а –  $B = 0$  Гс, б –  $B = 350$  Гс, 1 – эмиттер, 2 – коллектор, 3 – труба дрейфа.

Рассматриваемый источник электронов использовался для импульсного переплава поверхности металлической мишени с целью ее закалки из расплавленного состояния.

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

### Список литературы

1. Devyatkov V.N., Koval N.N. // Journal of Physics: Conference Series 552 0102014.
2. Koval N.N., Grigoryev S.V., Devyatkov V.N., Teresov A.D., Schanin P.M. // IEEE Transactions on Plasma Science 2009. V. 37. Issue 10. P. 1890-1986.
3. Grigoryev S.V., Devyatkov V.N., Koval N.N., Teresov A.D. // J Technical Physics Letters. 2010. V. 36. Issue 2. P. 158-161.

## ELECTRON SOURCE WITH A MULTIPLE-ARC PLASMA CATHODE FOR SURFACE MODIFICATION OF MATERIALS AND PRODUCTS

Maxim Vorobyov<sup>1</sup>, Vladimir Devyatkov<sup>1</sup>, Nikolai Koval<sup>1,2</sup>,  
Tamara Koval<sup>2</sup>, Nguyen Bao Hung<sup>2</sup>, Stepan Sulakshin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of High Current Electronics SB RAS, 634055, Akademichesky avenue 2/3, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Tomsk National Research Polytechnic University, 634050, Lenina avenue 30, Tomsk, Russia

vorobyovms@yandex.ru, vlad@opee.hcei.tsc.ru, koval@opee.hcei.tsc.ru,

tvkoval@mail.ru, baohung.ng@gmail.com, sulakshinsa@yandex.ru

The electron source with the grid plasma cathode based on multiple arc discharge at a low pressure (10-40 mPa) and a beam current pulse duration of hundreds of microseconds is intended for studies on the effects of dense beams on materials and products. The electron-emitting plasma is generated by six electroarc plasma generators located in the plasma cathode with a diameter of 800 mm and a length of 180 mm and with a grid emission window diameter of 140 mm. Under the influence of a constant accelerating voltage up to 90 kV applied between the plasma cathode with grid stabilization of the plasma boundary and the accelerating electrode combined with a drift tube length 750 mm, electrons are extracted from the plasma and accelerated to an energy corresponding to the applied voltage. The insertion of a longitudinal magnetic field is necessary to form and transport the electron beam and allows to decrease the beam current losses on the walls of specified electrodes, and as a consequence, to increase beam limited parameters. It is shown that in this system the discharge limited parameters of electron beam are restricted by its total energy at a level of about 5 kJ, above which the electric breakdown will occur in accelerating gap. This work deals with finding the optimum pressure range in which the beam has maximum parameters when transporting it into a longitudinal magnetic field, and identifying the mechanism of electrical breakdown of the high-voltage accelerating gap.