

ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ С СЕТЧАТЫМ ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ НА ОСНОВЕ МНОГОДУГОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

М.С. Воробьев, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин
Институт сильноточной электроники СО РАН,
пр. Академический 2/3, 634055 Томск, Россия

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

Основываясь на ранее проведенных исследованиях предельных параметров электронного пучка, генерируемого в источнике электронов с сетчатым плазменным катодом на основе многодугового разряда низкого давления, проведена модернизация этого источника, направленная на устранение возможных причин, ответственных за возникновение электрического пробоя высоковольтного ускоряющего промежутка. К одной из основных причин возникновения таких пробоев можно отнести наличие высокоэнергетического ионного потока, который не только взаимодействует с эмиссионным электродом, заряжая на нем диэлектрические включения, но и, попадая через ячейки эмиссионной сетки в пространство плазменного катода, приводит к изменению параметров эмиссионной плазмы, что может приводить к нарушению слоевой (сеточной) стабилизации. Поэтому модернизация источника электронов заключалась в переходе на горизонтальную транспортировку электронного пучка, что в перспективе позволит увеличить длину трубы дрейфа и, тем самым, уменьшить влияние взаимодействия электронного пучка с коллектором на ионно-электронные процессы в ускоряющем промежутке. Также проведены дополнительные меры по снижению концентрации коллекторной и пучковой плазмы. В предварительных экспериментах при ускоряющем напряжении до 50 кВ получен электронный пучок током 500 А длительностью 150 мкс на полувысоте, что открывает в ближайшей перспективе возможность его использования, например, в целях модификации поверхности тугоплавких материалов.

Введение

Высокотемпературная плазма, нагреваемая и поддерживаемая пучком, а также сам электронный пучок с высоким энергосодержанием может успешно использоваться в термоядерном материаловедении и для технологических коммерческих целей [1–3]. Использование для этих целей плазменных катодов представляется наиболее целесообразным и перспективным, т.к. в настоящее время они являются практически единственными эмиссионными структурами способными обеспечить субмиллисекундный килоамперный электронный пучок с энергией ускоренных электронов ≥ 100 кэВ, которые к тому же обладают рядом неоспоримых преимуществ перед традиционными термо- и взрыво-эмиссионными катодами как по параметрам, так и по эксплуатационным свойствам и сроку службы [4].

Последние несколько лет авторами данной работы велись работы по генерации мощных (~10 МВт) электронных пучков субмиллисекундной длительности, используя источник электронов с сетчатым плазменным катодом на основе многодугового разряда низкого давления [5–7]. Эксперименты, проведенные до модернизации данного источника электронов, доказали возможность получения электронного пучка энергией до 70 кэВ, током 1 кА, длительностью импульса до 100 мкс при общем энергосодержании пучка до 5 кДж. Эксперименты по введению электронного пучка в магнитную пробку, необходимые для увеличения времени удержания плотной дейтериевой плазмы, нагретой до субтермоядерных температур в осесимметричной многопробочной ловушке «ГОЛ-3», также подтвердили перспективность использования источников с сетчатым плазменным катодом, в которых предполагается, что отраженные от коллектора и магнитной пробки электроны, участвуя в ионизационных процессах, увеличивают концентрацию пучковой плазмы, необходимой для транспортировки электрон-

ного пучка. Однако в ряде экспериментов было показано, что интенсивное газовыделение с коллектора и трубы дрейфа под действием импульсного электронного пучка является ограничивающим фактором дальнейшего увеличения параметров генерируемого электронного пучка, и для дальнейшего увеличения энергосодержания в пучке следует принимать меры по снижению концентрации пучковой и коллекторной плазмы, образующейся как при ионизации электронным пучком газа, десорбированного с коллектора и трубы дрейфа, так и при плавлении коллектора под действием его бомбардировки пучком электронов. Снижение давления рабочего газа при условии полной компенсации пространственного заряда пучка также является одним из возможных путей увеличения параметров последнего. Поэтому с целью дальнейшего увеличения параметров генерируемого электронного пучка, данная работа направлена на модернизацию источника электронов с сетчатым плазменным катодом на основе многодугового разряда низкого давления, транспортировка электронного пучка в котором осуществляется до коллектора в ведущем магнитном поле.

Основная часть

Эксперименты проводились на модернизированном экспериментальном стенде [5], упрощенная схема которого представлена на рис. 1. В вакуумной камере 1 диаметром 800 мм и длиной 1000 мм на проходном высоковольтном изоляторе закреплен плазменный эмиттер 2, представляющий собой полый цилиндр из нержавеющей стали диаметром 200 мм и длиной 250 мм. На одном из торцов цилиндра по окружности диаметром 150 мм закреплены шесть катодных узлов с иницированием катодного пятна разрядом по поверхности диэлектрика [9, 10]. Магниевого катода 4 выполнены в виде стержня диаметром 4 мм и длиной 10 мм с аксиальным отверстием

диаметром 1 мм для равномерного напуска в плазменный эмиттер рабочего газа. Внутренняя поверхность плазменного эмиттера играет роль общего полого анода для многодугового разряда. Эмиссионное окно диаметром 140 мм перекрыто мелкоструктурной сеткой 6 из нержавеющей стали. Расстояние между эмиссионной сеткой 6 и фланцем камеры 1 составляет 90 мм. Ускорение

электронов происходит в катодном слое между сеточным эмиссионным электродом, стабилизирующим границу эмиссионной плазмы, и границей анодной пучковой плазмы, положение которой зависит от параметров генерируемого электронного пучка и подчиняется закону «степеней $3/2$ ».

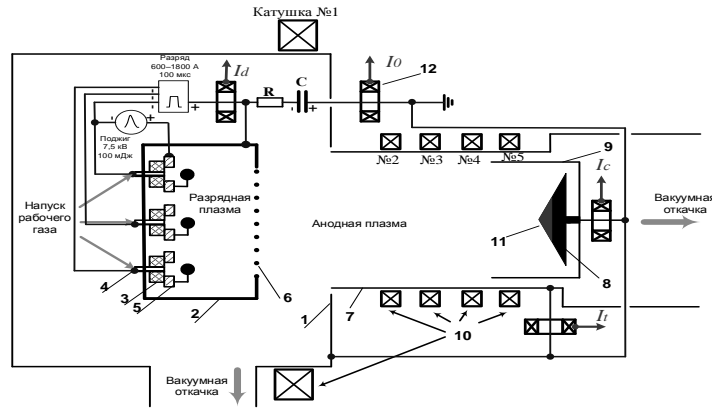


Рис. 1. Схема источника электронов с сетчатым плазменным катодом: 1 – вакуумная камера; 2 – сетчатый плазменный катод; 3 – изолятор; 4 – катод; 5 – поджигающий электрод; 6 – эмиссионная сетка; 7 – труба дрейфа; 8 – коллектор; 9 – цилиндр Фардея; 10 – катушки магнитного поля; 11 – молибденовая вставка; 12 – пояс Роговского

Ускоренные электроны поступают в трубу дрейфа 7 длиной 700 мм и диаметром 160 мм. Транспортировка электронного пучка до коллектора осуществляется в ведущем магнитном поле, которое обеспечивается магнитными катушками К№1÷К№5. В конце трубы дрейфа 7 установлен цилиндр Фардея с водоохлаждаемым медным конусообразным коллектором 8 высотой 100 мм, на вершине которого установлена молибденовая вставка 11 высотой 40 мм, помещенный в металлический стакан диаметром 100 мм высотой 250 мм. Вставка 11 на коллекторе выполнена из молибдена, имеющего сравнительно высокую температуру плавления ($2620\text{ }^{\circ}\text{C}$), что позволяет увеличить время до момента образования коллекторной плазмы, вызванной испарением материала коллектора и ионизацией этих паров.

Вакуумная откачка осуществляется турбомолекулярным насосом ТМН-500 со стороны вакуумной камеры. Кроме этого в конструкции макета источника электронов имеется возможность введения дополнительной откачки со стороны коллектора, что в перспективе позволит снизить остаточное давление газа в камере и пространстве дрейфа пучка при работе источника электронов на более высокой частоте следования импульсов до 1 с^{-1} . Однако в данных экспериментах данная возможность не использовалась.

Конфигурация ведущего магнитного поля, используемая для транспортировки электронного пучка, была оставлена прежней [7] и представлена на рис.2, а характерная осциллограмма тока разряда I_d , тока в ускоряющем промежутке I_0 , тока на трубу дрейфа I_t , тока коллектора I_c и суммы двух последних токов $I_{\Sigma}=(I_t+I_c)$ представлена на рис. 3. Из осциллограммы видно, что ток I_{Σ} меньше тока I_0 , что связано с потерями тока пучка на

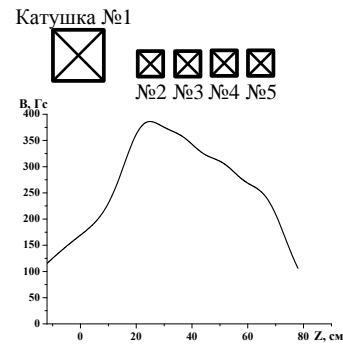


Рис. 2. Конфигурация магнитного поля вдоль оси транспортировки электронного пучка. Координата $Z=0$ соответствует положению эмиссионной сетки

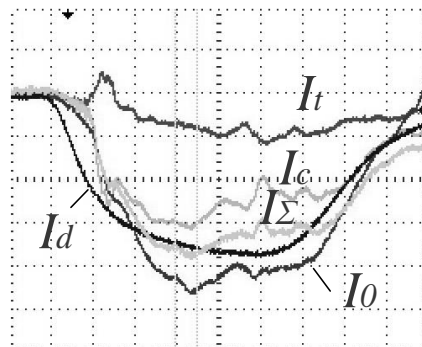


Рис. 3. Характерная осциллограмма токов в источнике электронов при $U_0=50\text{ кВ}$ и $p=20\text{ мПа}$ в конфигурации магнитного поля, представленной на рис.2. Масштаб: 100 А/кп., 25 мкс/кп

вакуумную камеру (на осциллограмме не отмечен).

Заключение

Проведена модернизация источника электронов с сетчатым плазменным катодом на основе многодугового разряда низкого давления, направленная на расширение предельных параметров генерируемого электронного пучка. Макет источника введен в эксплуатацию. В результате предварительных экспериментов при $U_0=50$ кВ получен электронный пучок током 500 А длительностью 150 мкс на полувысоте с энергосодержанием более 3 кДж, что открывает новые возможности для использования таких источников электронов, как в научных, так и технологических целях, например, для модификации поверхности тугоплавких материалов.

Список литературы

1. Surmeneva M.A., Chudinova E.A., Grubova I.Y., Surmenev R.A., Korneva O.S., Shulepov I.A., Teresov A.D., Koval N.N., Mayer J., Oehr C. // *Ceramics International*. 2016. V. 42. № 1. P. 1470-1475.
2. Gromov V.E., Yurev A.B., Morozov K.V., Ivanov Yu.F. // *The microstructure of quenched rails*. Cambridge international science publishing. 2016. 157 p.
3. Shoshin A.A., Arakcheev A.S., Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Huber A., Ivanov I.A., Kuklin K.N., Polosatkin S.V., Postupaev V.V., Sinitky S.L., Vasilyev A.A. // *Fusion Engineering and Design*. 2016. V. 113. P. 66-70.
4. Бугаев С.П., Крейндель Ю.Е., Щанин П.М. // *Электронные пучки большого сечения*. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
5. Vorob'ev M. S., Gamermaster S. A., Devyatkov V. N., Koval' N. N., Sulakshin S. A., and Shchanin P. M. // *Technical Physics Letters*. 2014. V. 40. № 6. P. 526-528.
6. Воробьев М.С., Григорьев С.В., Москвин П.В., Сулакшин С.А. // *Изв. ВУЗов. Физика*. 2014. Т. 57. №11/3. С. 199-204.
7. Воробьев М.С., Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Сулакшин С.А. // *Труды V Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника»*. Улан-Удэ. 2015. С.163-170.
8. Astrelin V.T., Kandaurov I.V., Vorobyov M.S., Koval N.N., Kurkuchekov V.V., Sulakshin S.A., Trunev Yu A. DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.03.025
9. Коваль Н.Н., Королев Ю.Д., Пономарев В.Б., Работкин В.Г., Шемякин И.А., Щанин П.М. // *Физика плазмы*. 1989. Т. 15. В. 6. С. 747-752.
10. Козырев А.В., Королев Ю.Д., Шемякин И.А. // *Известия ВУЗов. Физика*. 1994. № 3. С. 6-23.

ELECTRON SOURCE WITH A MESH PLASMA CATHODE ON THE BASIS OF A LOW PRESSURE MULTIARC DISCHARGE

Maxim Vorobyov, Vladimir Devyatkov, Nikolay Koval, Stepan Sulakshin
Institute of High Current Electronics, Siberian Branch
 2/3 Akademichesky Avenue, 634055 Tomsk, Russia

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

Based on the studies of the limiting parameters of the electron beam generated in the electron source with a mesh plasma cathode on the basis of a low-pressure multi-arc discharge, this source was modernized, aimed at eliminating the possible causes responsible for the occurrence of electrical breakdown of the high-voltage accelerating gap. One of the main causes of such breakdowns is the presence of a high-energy ion flux that interacts not only with the emission electrode, charging dielectric inclusions on it, but also, getting through the cells of the emission mesh into the plasma cathode space, leads to a change in the parameters of the emission plasma, which can lead to a violation of mesh stabilization. That's why the modernization of electron source consisted in the transition to the horizontal transportation of the electron beam, which in the future will allow to increase a drift tube and to reduce the effect of the electron beam interaction with the collector on the ion-electron processes in the accelerating gap. Additional actions have also been taken to reduce the concentration of collector's and beam's plasma. In preliminary experiments with an accelerating voltage of up to 50 kV, an electron beam with a current of 500 A was obtained with a duration of 150 μ s at half-height, which opens the possibility in the near future of its use, for example, for the surface modification of refractory materials.