

Источник электронов с многодуговым плазменным эмиттером

*М. С. Воробьев, В. Н. Девятков, В. В. Денисов, С. А. Гамермайстер, Н. Н. Коваль,
С. А. Сулакшин, В. В. Шугуров, В. В. Яковлев*

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Россия, Томск
e-mail: vorobyovms@yandex.ru

В работе описан источник электронов с плазменным катодом на основе разрядной системы с шестью дуговыми плазмоденераторами, работающими на общий цилиндрический полый анод. При синхронной работе плазмоденераторов полый анод заполняется плотной низкотемпературной плазмой, эмиссионная граница которой стабилизируется мелкоструктурной металлической сеткой. Ток дуги каждого плазмоденератора составляет (100–300) А при длительности импульсов 150 мкс. Под действием постоянного ускоряющего напряжения до 80 кВ, приложенного между плазменным катодом и заземленным ускоряющим электродом, совмещенным с трубой дрейфа, происходит извлечение электронов из плазмы и их ускорение. Коллектор установлен в конце трубы дрейфа длиной 700 мм. В предварительных экспериментах в отсутствие внешнего магнитного поля получен электронный пучок с амплитудой тока до 1 кА при длительности импульсов 150 мкс и энергией в импульсе около 3,5 кДж. Пучок планируется использовать как в научных исследованиях, так и в технологических целях.

Введение

В настоящее время достоверно известно о перспективности применения плазменных катодов для получения сильноточных пучков в субмиллисекундном диапазоне длительностей импульса. В работе [1] создан электронный источник с плазменным эмиттером на основе высоковольтного тлеющего разряда с достигнутой плотностью тока эмиссии около 50 А/см^2 при давлении рабочего газа (He) 0,5 Па, величине ускоряющего напряжения до 150 кВ, общим током до 750 А и длительности импульса около 120 мкс. Дальнейшее повышение тока и ускоряющего напряжения ограничено необходимостью поддержания в разрядном промежутке достаточно высокого давления, что неизбежно приводит к снижению электрической прочности ускоряющего промежутка. Кроме того, при больших токах разряда есть существенная вероятность перехода тлеющего разряда в дуговой, что нарушает нормальную работу плазменного источника электронов.

Высоких значений плотности тока при низких давлениях можно достичь в разрядных системах, в которых плазма создается дуговыми разрядами низкого давления. В работах [2, 3] рассматривается возможность создания источника электронов с плазменным эмиттером на основе низковольтного дугового разряда для создания интенсивного пучка, транс-

портируемого в ведущем магнитном поле. Достигнутая величина плотности тока пучка в этих источниках составляет 55 А/см^2 при 40 кВ ускоряющего напряжения и длительности импульса 250 мкс. Отличительной особенностью данных источников электронов [1–3] является многоапертурная система извлечения электронов с открытой плазменной границы.

В работе [4] описывается источник электронов с плазменным эмиттером на основе низковольтного дугового разряда с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы. Таким способом получен пучок электронов с плотностью тока более 70 А/см^2 при общем токе 250 А, длительности импульсов 200 мкс и ускоряющем напряжении до 25 кВ, транспортируемый в продольном магнитном поле величиной 500 Гс. Давление рабочего газа аргона в такой системе составляло $(2–4) \times 10^{-2}$ Па. Относительно высокая плотность тока эмиссии электронов до 20 А/см^2 достигается за счет электронов, эмитированных из плазмы, и электронов, полученных в результате ионно-электронной эмиссии при бомбардировке эмиттерного электрода и сетки ионами остаточного и напускаемого в камеру газов [5].

Основной проблемой, возникающей при генерировании интенсивных пучков субмиллисекундной длительности импульсов, является высокая вероятность пробоя ускоряющего промежутка, так как необходимое для его раз-

вития время зачастую меньше длительности импульса тока пучка. Основной же причиной пробоя ускоряющего промежутка является, вероятно, зарядка диэлектрических включений ионами, идущими из пространства дрейфа пучка, и их пробой с инициированием катодного пятна на эмиттерном электроде или сетке. Именно поэтому возникает острая необходимость в тщательной «тренировке» источника электронов, использовании безмасляной откачки и выборе необходимого материала сетки, стабилизирующей эмиссионную границу плазмы в плазменном катоде [6].

Экспериментальная установка

Для проведения экспериментов по получению субмиллисекундного пучка электронов с амплитудой тока в сотни ампер был разработан и создан экспериментальный стенд, внешний вид которого представлен на рис. 1. В вакуумной камере диаметром 800 мм и длиной 1000 мм (рис. 2) на проходном высоковольтном изоляторе закреплен сетчатый плазменный эмиттер, представляющий собой полый цилиндр из нержавеющей стали диаметром 200 мм и длиной 250 мм, на одном из торцов которого закреплены шесть плазменных источников (плазмодгенераторов) на основе дуги низкого давления с инициированием катодного пятна разрядом по поверхности диэлектрика.



Рис. 1. Внешний вид источника электронов

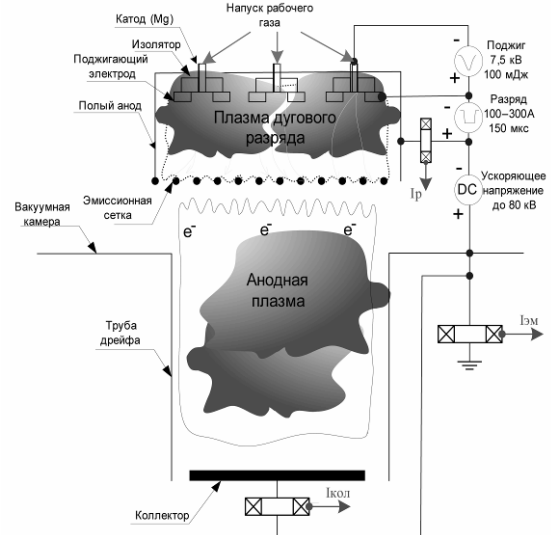


Рис. 2. Блок-схема многодугового источника электронов с плазменным эмиттером

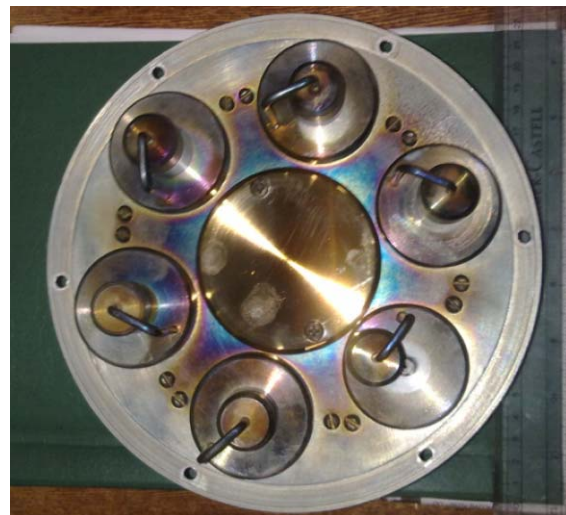
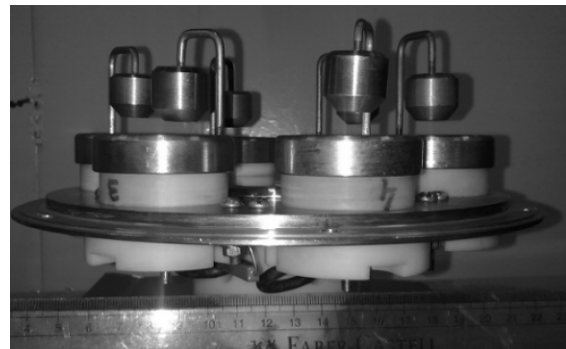


Рис. 3. Внешний вид катодного узла плазменного эмиттера, состоящего из шести дуговых плазмодгенераторов

Внешний вид катодного узла плазменного эмиттера с шестью плазмодгенераторами представлен на рис. 3. Внутренняя поверхность плазменного эмиттера играет роль общего полого анода для всех шести источников

плазмы. Источник плазмы состоит из диэлектрического основания, на котором закреплены магниевый катод и поджигающий электрод, разделенные коаксиальным зазором в 1 мм. Каждый магниевый катод выполнен в виде стержня диаметром 4 мм и длиной 10 мм с аксиальным отверстием диаметром 1 мм для непосредственного напуска рабочего газа в каждый плазмогенератор. На противоположной стороне плазменного эмиттера имеется эмиссионное окно диаметром 140 мм, затянутое сеткой из нержавеющей стали с ячейками $0,4 \times 0,4$ мм и геометрической прозрачностью 60 %. Подвод электрического питания к плазменному эмиттеру осуществляется многожильным высоковольтным кабелем КПВ-300/7, помещенным, как и изолятор, в сосуд со сжатым до 5 атм. газообразным азотом для увеличения их электрической прочности. Расстояние между плазменным эмиттером и анодом составляет 90 мм. Ускорение электронов происходит в слое между сеточным эмиссионным электродом и границей анодной плазмы, образующейся в процессе ионизации остаточного и рабочего газа электронами пучка в ускоряющем зазоре и пространстве дрейфа пучка. Расстояние, на котором устанавливается граница анодной плазмы, подчиняется «закону степени $3/2$ ». Электроны, ускоренные до энергий, соответствующих приложенному ускоряющему напряжению, продолжают свое движение в трубе дрейфа длиной 700 мм и диаметром 160 мм, в конце которой установлен коллектор из нержавеющей стали диаметром 150 мм.

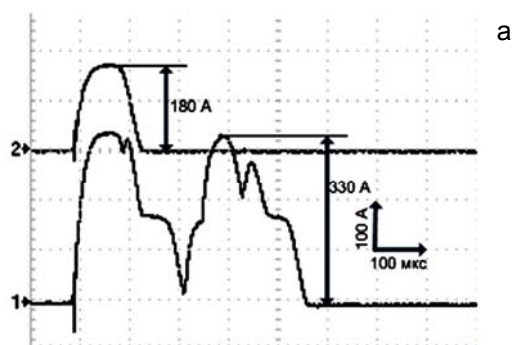
Для созданного экспериментального стенда были собраны схемы электропитания и управления с использованием современной электронной базы. Схема электропитания разряда позволяет получать общий ток разряда (со всех плазмогенераторов) до 2 кА в режиме одиночных импульсов с длительностью 150 мкс. Для создания системы управления с дистанционным регулированием основных параметров пучка была принята концепция автономного питания систем на стороне высокого потенциала относительно «земли» (до 80 кВ) с использованием аккумулятора. Автономный источник энергии предназначен для электрического питания разряда и питания

системы поджига разряда. Управление и контроль параметров разряда осуществляется по оптоволоконным каналам связи. Конденсаторная батарея генератора ускоряющего напряжения представляет собой три последовательных каскада, параллельно соединенных между собой высоковольтных конденсаторов (по три в каждом каскаде) общей емкостью 3 мкФ. С конденсаторной батареи высокое напряжение через ограничительное сопротивление величиной 16 Ом по высоковольтному кабелю подается на плазменный эмиттер ускорителя.

Результаты экспериментов и их обсуждение

При осесимметричном расположении плазмогенераторов, показанным на рис. 3, распределение плотности электронного тока по поверхности эмиссионной сетки представляет собой суперпозицию распределений плотностей тока от каждого отдельно взятого плазмогенератора. Это позволяет получать большую суммарную величину тока эмиссии при относительно однородном распределении плотности извлекаемого из плазмы электронного тока, что снижает вероятность пробоя ускоряющего промежутка. Кроме того, для исключения вероятности контрагирования разрядного тока и выравнивания плотности эмитирующей плазмы на расстоянии 5 мм от каждого из катодов устанавливаются распределительные электроды диаметром 15 мм высотой 20 мм.

На рис. 4 представлены типичные осциллограммы, иллюстрирующие режимы неустойчивой (а) и устойчивой (б) работы катодного узла плазменного эмиттера. Разброс в срабатывании отдельных плазмогенераторов связан с неодновременным инициированием разряда в этих плазмогенераторах.



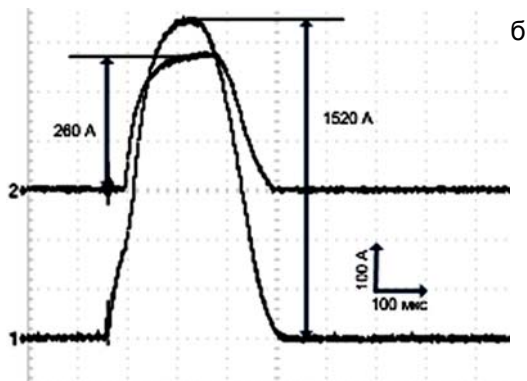


Рис. 4. Характерные осциллограммы токов разряда шести плазмогенераторов (1) и одного из плазмогенераторов (2) для несинхронного (а) и синхронного (б) запуска плазмогенераторов

Схема электрического питания плазменного эмиттера позволяет производить синхронный запуск всех шести плазмогенераторов. Электропитание поджига дугового разряда осуществляется от генератора поджигающих импульсов, формирующего импульсы амплитудой 7,5 кВ и длительностью 5 мкс, а питание основного разряда – от шести искусственных формирующих линий, которые заряжаются через разделительный трансформатор от выпрямителя и обеспечивают ток разряда каждого из плазмогенераторов до 300 А при длительности 150 мкс. Для устранения самопроизвольного пробоя линии через разрядный промежуток в катодной цепи каждой искусственной формирующей линии стоит тиристор, открывающийся синхронно с поджигающим импульсом. При подаче высокого напряжения на ускоряющий промежуток стабильность зажигания разряда каждого плазмогенератора также возрастает. Это связано, вероятно, с проникновением в разрядную область высокоэнергетичных ионов из ускоряющего зазора, а также наличием провисающего через ячейки сетки электрического поля ускоряющего промежутка, что впоследствии приводит к снижению импеданса разрядного промежутка.

На созданном стенде были проведены предварительные исследования, в ходе которых был получен электронный пучок с длительностью импульса до 150 мкс и общим током амплитудой до 1 кА при начальном ускоряющем напряжении до 60 кВ.

По мере прохождения импульса ускоряющее напряжение уменьшается за счет уно-

са заряда из конденсаторной батареи и падения напряжения на ограничивающих ток пробоя сопротивлениях. Просадку напряжения при больших токах можно устранить только путем увеличения емкости конденсаторной батареи, что ведет к повышению уровня наводок при пробоях ускоряющего промежутка. Энергия ускоренных электронов имеет достаточно широкий разброс. Оцененная из осциллограмм тока пучка и напряжения на ускоряющем промежутке усредненная энергия электронного пучка в импульсе составляла 3,5 кДж. Характерные осциллограммы токов дугового разряда I_p , эмиссии $I_{эм}$ и коллектора $I_{кол}$ приведены на рис. 5.

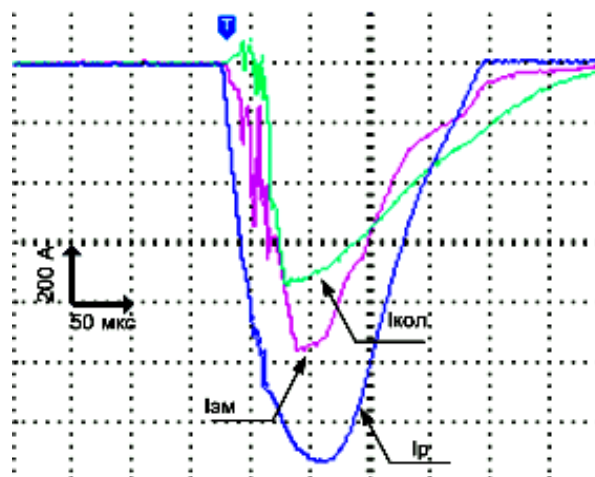


Рис. 5. Характерные осциллограммы токов разряда I_p , эмиссии $I_{эм}$ и коллектора $I_{кол}$ при начальном ускоряющем напряжении $U_{уск}=60$ кВ и давлении аргона 2×10^{-2} Па

На коллекторе, установленном в конце трубы дрейфа, фиксировался автограф пучка в виде расплава поверхности диаметром около 40 мм (рис. 6). Сжатие пучка происходит, вероятно, под действием собственного магнитного поля пучка в условиях компенсации его пространственного заряда ионами, образованными пучком в пространстве дрейфа при отсутствии внешнего продольного ведущего магнитного поля. Наблюдаемый на коллекторе пространственный разброс отпечатка пучка связан с неконтролируемыми флуктуациями тока пучка в ускоряющем зазоре и пространстве дрейфа в отсутствие внешнего ведущего магнитного поля.

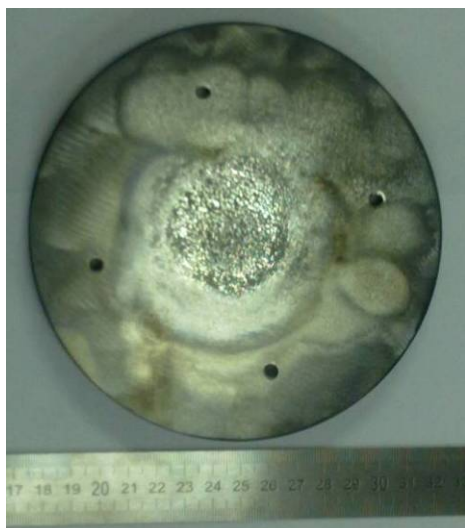


Рис. 6. Автограф полученного пучка электронов диаметром около 40 мм на коллекторе из нержавеющей стали

Заключение

Таким образом, создан экспериментальный стенд для исследования характеристик источника электронов на основе многодугового плазменного эмиттера с сеточной стабилизацией эмиссионной границы плазмы.

Отличительной особенностью разработанного многодугового плазменного эмиттера является его способность плавного регулирования эмиссионного тока путем изменения величины тока разряда в диапазоне (0,5 – 2) кА при длительности импульсов 150 мкс. Причем такое регулирование осуществляется со стороны низкого «земляного» потенциала при полной гальваноразвязке схемы питания эмиттера, находящейся на высоковольтной (до 80 кВ) стороне.

На созданном стенде получен электронный пучок с амплитудой тока до 1 кА и общей энергией в импульсе около 3,5 кДж, что пер-

спективно для его применения как в научных, так и в технологических целях.

Работа проведена при поддержке интеграционного междисциплинарного проекта СО РАН № 104 и Программы Президиума РАН № 12 проект 8.

Литература

1. Goebel D. M., Schumacher R. W., and Watkins R.M. Long pulse, plasma cathode e-gun // Proc. Conf. on High Power Particle Beams, Washington, DC, May 25–29, 1992. P. 1093–1098.
2. Куркучиков В. В., Астрелин В. Т., Кандауров И. В., Трунев Ю. А. Формирование интенсивного электронного пучка в многопертурном диоде с плазменным эмиттером и его транспортировка сквозь магнитную пробку // XXXIX Междунар. Звенигородская конф. по физике плазмы и УТС, 6–10 февраля 2012.
3. Kandaurov I. V. et al. Study of Intensive Long-Pulse Electron Beam Generation in a Source with Arc Plasma Emitter Operated in a External Magnetic Field // Proceedings of 15th Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, 2008. P. 121–124.
4. Koval N. N., Grigoryev S. V., Devyatkov V. N., Teresov A. D., Schanin P. M. Effect of Intensified Emission During the Generation of a Submillisecond Low-Energy Electron Beam in a Plasma-Cathode Diode // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. Vol. 37. № 10. P. 1890–1896.
5. Григорьев С. В., Десятков В. Н., Коваль Н. Н., Тересов А. Д. Эффект усиления эмиссии при генерации низкоэнергетического субмиллисекундного электронного пучка в диоде с сеточным плазменным катодом и открытой границей анодной плазмы // Письма ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 4. С. 23–31.
6. Метель А. С., Григорьев С. Н., Мельник Ю. А. Физические основы генерации концентрированных потоков энергии. М.: Станкин, 2009. С. 155.