

УДК 537.533.9, 537.533.2

*М.С. ВОРОБЬЁВ**, *В.Н. ДЕВЯТКОВ**, *Н.Н. КОВАЛЬ*,***, *С.А. СУЛАКШИН**, *П.М. ЩАНИН**

ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ С СЕТЧАТЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ИНТЕНСИВНОГО ПУЧКА СУБМИЛЛИСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ¹

Описан источник электронов с плазменным эмиттером на основе дуговой разрядной системы с шестью катодами и общим цилиндрическим полым анодом. При синхронном зажигании вакуумных дуговых разрядов пространство полого анода заполняется плотной низкотемпературной плазмой, эмиссионная граница которой стабилизируется мелкоструктурной металлической сеткой площадью 150 см². Амплитуда тока дуги с каждого катода составляет 100–300 А. Под действием постоянного ускоряющего напряжения до 90 кВ, приложенного между плазменным эмиттером и заземленным ускоряющим электродом, совмещенным с трубой дрейфа, происходит извлечение электронов из плазмы и их ускорение. При рабочем давлении 0.04 Па получен электронный пучок с максимальной амплитудой тока 1 кА и длительностью импульса на полувысоте 100 мкс, который транспортируется до коллектора в продольном магнитном поле величиной до 35 мТл на расстояние 80 см. Предельные параметры электронного пучка ограничены суммарной энергией пучка на уровне около 4 кДж, при превышении которой происходит электрический пробой ускоряющего промежутка. Наиболее вероятно, что основной причиной пробоя промежутка являются значительные газосодержания с коллектора и трубы дрейфа под действием импульсного электронного пучка.

Ключевые слова: плазменный эмиттер, источник электронов, интенсивный пучок, транспортировка пучка.

Введение

В настоящее время известно о перспективности применения плазменных катодов для получения интенсивных пучков в субмиллисекундном диапазоне длительностей импульса [1]. В работе [2] описан электронный источник с плазменным эмиттером на основе высоковольтного тлеющего разряда с плотностью тока эмиссии около 50 А/см², общим током до 750 А при величине ускоряющего напряжения до 150 кВ и длительности импульса около 120 мкс. Дальнейшее повышение тока, длительности импульса и ускоряющего напряжения ограничено необходимостью поддержания в разрядном промежутке достаточно высокого давления (≥ 0.5 Па), что неизбежно приводит к снижению электрической прочности ускоряющего промежутка.

В работе [3] рассматривается возможность создания источника электронов с плазменным эмиттером на основе низковольтного дугового разряда и многоапертурной системой извлечения электронов с открытой плазменной границы, генерирующего интенсивный пучок, транспортируемый в ведущем магнитном поле величиной около 0.1 Тл. Достигнутая величина тока пучка в этих источниках составляет 70 А при 100 кВ ускоряющего напряжения и длительности импульса 170 мкс. В работах [4, 5] описываются источники электронов с плазменными эмиттерами на основе низковольтного дугового разряда с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы. Плотность эмиссионного тока в [4] составляла 30 А/см², а затем в пространстве дрейфа пучок фокусировался под действием собственного магнитного поля, и на коллекторе его плотность тока достигала 70 А/см² при общем токе 250 А, длительности импульсов 200 мкс и ускоряющем напряжении до 25 кВ. В источнике [5] при плотности тока эмиссии 12 А/см² и длительности импульса 30 мкс амплитуда тока пучка достигала 600 А, который впоследствии так же, как и в [4], фокусировался собственным магнитным полем с получением на коллекторе плотности тока пучка около 100 А/см².

Экспериментальная аппаратура и методики измерений

Для решения задачи генерации килоамперного электронного пучка при длительности импульса более 100 мкс и ускоряющем напряжении более 50 кВ для применения его в экспериментах по поддержанию высокой температуры плазмы в открытых магнитных ловушках на установке ГОЛ-3 [3] был модернизирован источник электронов, описанный в работе [6], который ранее ра-

¹ Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 12 проект 8.

ботал в пакетно-импульсном режиме с амплитудой тока пучка до 700 А и энергии ускоренных электронов до 25 кэВ, а также разработаны новые схемы его электропитания, управления и диагностики пучка. Предлагаемая схема электропитания разряда в режиме одиночных импульсов позволяет получать общий ток разряда амплитудой до 1.8 кА с длительностью 100 мкс на полувысоте.

Схема модернизированного источника электронов представлена на рис. 1. В вакуумной камере 1 диаметром 80 см и длиной 100 см на проходном высоковольтном изоляторе закреплен плазменный эмиттер 2, представляющий собой полый цилиндр из нержавеющей стали диаметром 20 см и длиной 25 см. На одном из торцов цилиндра по окружности диаметром 15 см закреплены шесть катодных узлов с инициированием катодного пятна разрядом по поверхности диэлектрика. Каждый катодный узел состоит из диэлектрического основания 3, на котором закреплены магниевый катод 4 и поджигающий электрод 5, разделенные коаксиальным зазором 1 мм. Магниевого катоды выполнены в виде стержня диаметром 4 мм и длиной 10 мм с аксиальным отверстием диаметром 1 мм для напуска рабочего газа в плазменный эмиттер. Внутренняя поверхность плазменного эмиттера общей площадью около 0.2 м^2 играет роль общего полого анода для отдельных дуговых разрядов всех катодных узлов. Эмиссионное окно диаметром 14 см перекрыто мелкоструктурной сеткой 6 из нержавеющей стали с ячейками $0.4 \times 0.4 \text{ мм}$ и геометрической прозрачностью 35 %. Расстояние между эмиссионной сеткой и фланцем камеры 1 составляет 90 мм. Ускорение электронов происходит в катодном слое между сеточным эмиссионным электродом 6, стабилизирующим границу катодной плазмы, и границей анодной пучковой плазмы, образующейся в процессе ионизации остаточного и рабочего газа электронами пучка в ускоряющем зазоре и пространстве дрейфа пучка. Электроны, ускоренные до энергии, соответствующей приложенному ускоряющему напряжению, поступают в трубу дрейфа 7 длиной 80 см и диаметром 16 см, в конце которой установлен цилиндр Фарадея с водоохлаждаемым медным конусообразным электродом 8 диаметром 10 см, помещенным в металлический стакан 9 такого же диаметра и высотой 25 см. Транспортировка электронного пучка осуществляется в ведущем магнитном поле, обеспечиваемым катушками 10.

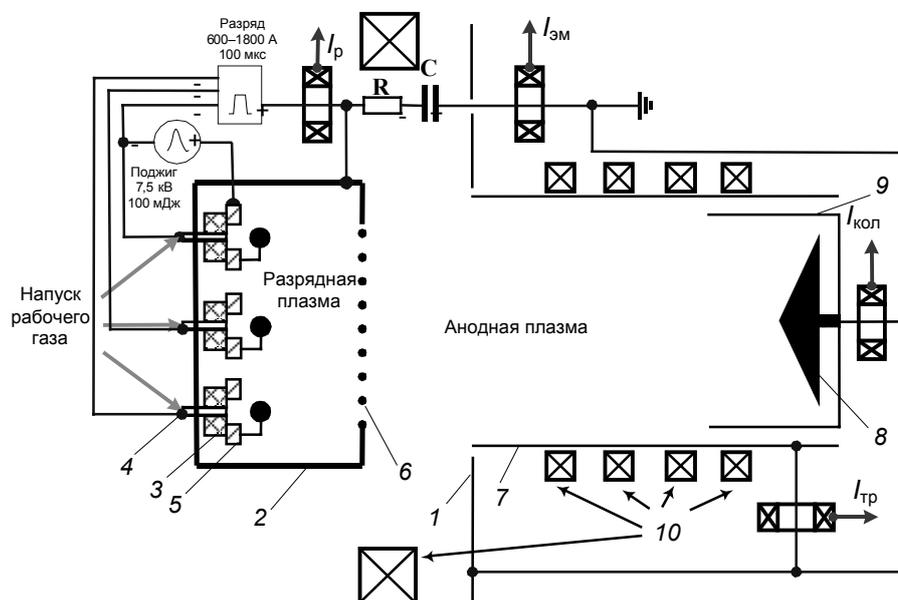


Рис. 1. Схема источника электронов с сетчатым плазменным эмиттером

Для увеличения однородности распределения плотности извлекаемого из плазменного эмиттера электронного тока и уменьшения вероятности пробоя ускоряющего промежутка на расстоянии 5 мм от каждого из катодов устанавливаются металлические токоперераспределяющие электроды 10 диаметром 15 мм, электрически соединенные с поджигающим электродом 5.

В первых экспериментах использовалась конденсаторная батарея электропитания ускоряющего промежутка общей емкостью $C = 3 \text{ мкФ}$, которая представляла собой три последовательных каскада из трех параллельно соединенных между собой высоковольтных конденсаторов. Зарядка батареи осуществляется от высоковольтного источника постоянного напряжения до $U = 90 \text{ кВ}$. От

конденсаторной батареи высокое напряжение по высоковольтному кабелю подается на плазменный эмиттер источника электронов через ограничительное сопротивление $R = 3$ Ом. Основным недостатком этой батареи являлась просадка напряжения, которая за время импульса тока пучка амплитудой 1 кА составляла $\Delta U = 32$ кВ.

В последующих экспериментах емкость конденсаторной батареи была увеличена до $C = 6$ мкФ, что позволило в 2 раза уменьшить просадку напряжения на батарее при прохождении импульса тока пучка.

Транспортировка пучка осуществляется в условиях компенсации его пространственного заряда ионами, образованными в ускоряющем зазоре и пространстве дрейфа при взаимодействии электронного пучка с остаточным и рабочим газом. Образованные ионы в основном замыкаются на трубу дрейфа и эмиссионный электрод, в то время как низкоэнергетические электроны движутся вдоль силовых линий магнитного поля и уходят на коллектор. Внешнее продольное магнитное поле обеспечивает сжатие пучка при его формировании, что позволяет транспортировать его до коллектора с минимальными потерями тока на трубе дрейфа.

Результаты и их обсуждение

Характерные осциллограммы тока дугового разряда I_d , тока в ускоряющем промежутке I_e , тока трубы дрейфа I_t и тока коллектора I_c при электропитании электронного источника от конденсаторной батареи емкостью $C = 3$ мкФ, давлении рабочего газа 0.04 Па (Ar) и начальном ускоряющем напряжении 70 кВ, а также зависимости тока в ускоряющем промежутке от величины ускоряющего напряжения, приведены на рис. 2.

Слабую зависимость тока пучка от величины ускоряющего напряжения можно объяснить ограниченной током разряда эмиссионной способностью плазменного катода. При начальном напряжении $U_a = 80$ кВ и амплитуде тока пучка 1 кА на коллекторе выделялась энергия около 3.5 кДж, что хорошо согласуется с ее расчетным значением, и фиксировался автограф пучка в виде оплавления диаметром около 50 мм.

При увеличении емкости конденсаторной батареи до $C = 6$ мкФ характер зависимости тока в ускоряющем промежутке от ускоряющего напряжения практически не изменился, что также объясняется ограниченной эмиссионной способностью плазменного катода с сохранением той же энергии пучка при той же длительности импульса около 100 мкс на полувысоте. Таким образом, при начальном ускоряющем напряжении 90 кВ максимальный ток ускоряющего промежутка, при котором не происходил его пробой, составил 500 А, а величина тока в ускоряющем промежутке амплитудой 1 кА стала достижимой только при начальном ускоряющем напряжении величиной $U_a = 50$ кВ. То есть в условиях эксперимента электрический пробой промежутка связан с достижением некоторой пороговой энергии пучка.

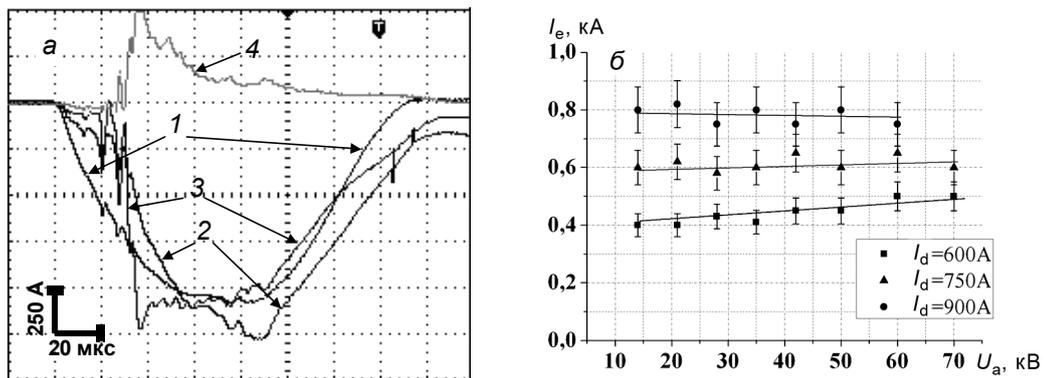


Рис. 2. Характерные осциллограммы токов: 1 – ток разряда I_d ; 2 – ток ускоряющего промежутка I_e ; 3 – ток коллектора I_c ; 4 – ток трубы дрейфа I_t при начальном ускоряющем напряжении $U_a = 70$ кВ и давлении рабочего газа (Ar) $4 \cdot 10^{-2}$ Па (а) и зависимость тока в ускоряющем промежутке I_e от величины ускоряющего напряжения U_a для разных токов разряда I_d (б)

Заключение

Получено экспериментальное подтверждение того, что ограничивающим фактором дальнейшего увеличения параметров электронного пучка в источнике электронов с многодуговым плазменным катодом являются значительные газовыделения с коллектора и трубы дрейфа под действием импульсного электронного пучка. Максимально достигнутая в экспериментах энергия электронного пучка при длительности импульса 100 мкс на полувысоте составила около 4 кДж. Для дальнейшего увеличения энергозапаса в пучке следует предпринимать меры по уменьшению газовой выделению с коллектора и трубы дрейфа, эффективной откачке десорбированного газа, а также деионизации коллекторной плазмы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваль Н.Н., Окс Е.М., Протасов Ю.С., Семашко Н.Н. Эмиссионная электроника. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 596 с.
2. Goebel D.M., Schumacher R.W., and Watkins R.M. Long pulse, plasma cathode e-gun // Proc. Conf. on High Power Particle Beams. – Washington, USA, 1992. – P. 1093.
3. Kandaurov I., Astrelin V., Avrorov A., Burdakov A., Bykov P., Derevyankin G., Kapitonov V.A., Kurkuchekov V., Rovenskikh A., Sinitsky S., Trunev Yu., and Yarovoy V. Submillisecond Electron Beam for Plasma Heating in Multi-mirror Trap GOL-3 // Fusion Science and Technology. – 2011. – V. 59. – No. 1. – P. 67.
4. Григорьев С.В., Девятков 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 в ЖТФ. – 2010. – Т. 36. – Вып. 4. – С. 23.
5. Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Щанин П.М. Генерация и транспортировка сильноточных низкоэнергетических электронных пучков в системе с газонаполненным диодом // ЖТФ. – 1998. – Т. 68. – Вып. 1. – С. 44.
6. Гушенец В.И., Коваль Н.Н., Щанин П.М. Генерация сильноточных электронных пучков наносекундной длительности с высокой частотой повторения импульсов // Письма в ЖТФ. – 1990. – Т. 16. – Вып. 8. – С. 12.

*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 01.10.14.

**Национальный исследовательский Томский государственный университет,

г. Томск, Россия

E-mail: vorobyovms@yandex.ru

Воробьев Максим Сергеевич, мл. науч. сотр.;

Девятков Владимир Николаевич, науч. сотр.;

Коваль Николай Николаевич, д.т.н., зав. лабораторией ИСЭ СО РАН, профессор НИТГУ;

Сулакшин Степан Александрович, ведущ. инженер;

Щанин Пётр Максимович, гл. науч. сотр.

M.S. VOROBYOV, V.N. DEVYATKOV, N.N. KOVAL, S.A. SULAKSHIN, P.M. SCHANIN

ELECTRON SOURCE WITH GRID PLASMA EMITTER FOR GENERATING SUBMILLISECOND DURATION INTENSE BEAM

In this paper an electron source with plasma emitter based on arc discharge system with six cathodes and a common cylindrical hollow anode is described (Fig. 1). At simultaneous ignition of vacuum arc discharges the hollow anode is filled of dense low-temperature plasma. An emission boundary of this plasma is stabilized a fine-grained metal grid with area of 150 cm^2 . The amplitude of the arc current from each cathode is $100\text{--}300 \text{ A}$. Under the influence of a constant accelerating voltage up to 90 kV which applied between a plasma emitter and grounded accelerating electrode, combined with the drift tube, electrons are extracted from the plasma and accelerated. At working pressure 0.04 Pa , an electron beam with a maximum amplitude of the current up to 1 kA and pulse duration at half-height of $100 \mu\text{s}$, which is transported to the collector in a longitudinal magnetic field of 35 mT at a distance of 80 cm . Limiting parameters of the electron beam is a total energy of the beam at the level of about 4 kJ . Above this energy an electrical breakdown of the accelerating gap is occurred. The main reason for the breakdown of the gap is significant outgassing from the collector and the drift tube under the influence of an intense electron beam.

Keywords: plasma emitter, electron source, intense beam, beam transport.

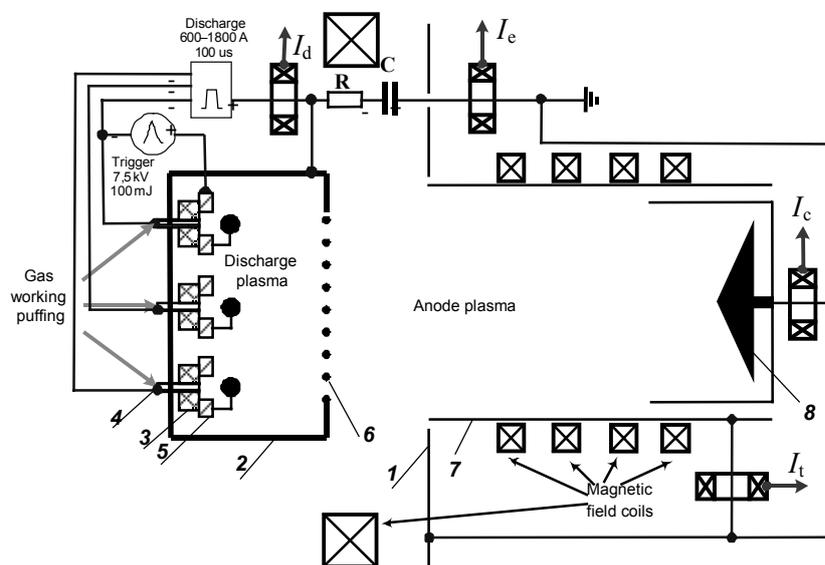


Fig. 1. Scheme of the electron source with multiple arc plasma emitter: 1 – vacuum chamber; 2 – plasma emitter; 3 – insulator; 4 – cathode; 5 – ignition electrode; 6 – emission grid; 7 – drift tube; 8 – collector.

REFERENCES

1. Koval N.N., Oks E.M., Protasov Y.S., Semashko N.N. *Emission electronics*. Moscow, Publishing House of the MSTU. NE Bauman, 2009, 596 p.
2. Goebel D.M., Schumacher R.W., and Watkins R.M. Long pulse, plasma cathode e-gun. *Proc. Conf. on High Power Particle Beams*. Washington, USA, 1992, p. 1093.
3. Kandaurov I., Astrelin V., Avrorov A., Burdakov A., Bykov P., Derevyankin G., Kapitonov V.A., Kurkuchekov V., Rovenskikh A., Sinitsky S., Trunev Yu., and Yarovoy V. (2011). Submillisecond Electron Beam for Plasma Heating in Multi-mirror Trap GOL-3. *Fusion Science and Technology*, 59(1), 67.
4. Grigoriev S.V., Devyatkov V.N., Koval N.N., Teresov A.D. (2010). The effect of enhancing the emission in the generation of low-energy electron beam submillisekundnogo diode plasma cathode grid and open borders anode plasma. *Technical Physics Letters*, 36(4), 23.
5. Devyatkov V.N., Koval N.N., Schanin P.M. (1998). Generation and transport of high-low energy electron beams in a system with a gas-filled diode. *Zh.*, 68(1), 44.
6. Gushnets V.I., Koval N.N., Schanin P.M. (1990). Generation of high-current electron beams nano-second duration with high pulse repetition frequency. *Technical Physics Letters*, 16(8), 12.