

12

Источник электронов с многодуговым плазменным эмиттером для получения мегаваттных пучков субмиллисекундной длительности

© М.С. Воробьёв, С.А. Гамермайстер, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль,
С.А. Сулакшин, П.М. Щанин

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск
E-mail: vorobyovms@yandex.ru

Поступило в Редакцию 30 января 2014 г.

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 cm^2 . Амплитуда тока дуги с каждого катода составляет 100–300 А. Под действием постоянного ускоряющего напряжения, 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 при начальном ускоряющем напряжении до 80 кВ и длительности импульса на полувывоте $100\text{ }\mu\text{s}$, который транспортируется до коллектора в продольном магнитном поле величиной до 0.035 Т на расстояние 80 см.

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 A/cm^2 , общим током до 750 А при величине ускоряющего напряжения до 150 кВ и длительности импульса около $120\text{ }\mu\text{s}$. 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 Т. Достигнутая величина тока пучка в этих источниках составляет 70 А при 100 кВ ускоряющего напряжения и длительности импульса 170 μ s. 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 μ s и ускоряющем напряжении до 25 кВ. В источнике [5] при плотности тока эмиссии 12 А/см² и длительности импульса 30 μ s 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.

Для решения задачи генерации килоамперного электронного пучка при длительности импульса более 100 μ s и ускоряющем напряжении более 50 кВ с целью применения его в экспериментах по поддержанию высокой температуры плазмы в открытых магнитных ловушках [3] был модернизирован источник электронов, описанный в работе [6], который ранее работал в пакетно-импульсном режиме с амплитудой тока пучка до 700 А и энергии ускоренных электронов до 25 кеВ, а также разработаны новые схемы его электропитания, управления и диагностики пучка.

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 иницированием катодного пятна разрядом по поверхности диэлектрика. Каждый катодный узел состоит из диэлектрического основания 3, на котором

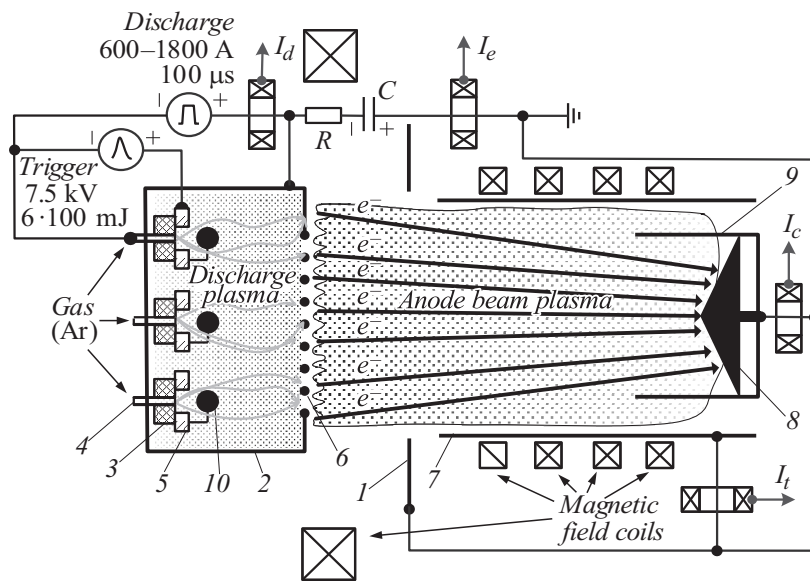


Рис. 1. Схема источника электронов с сеточным плазменным эмиттером.

закреплены магниевый катод 4 и поджигающий электрод 5, разделенные коаксиальным зазором 1 мм. Магниевые 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 м² 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 × 0,4 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.

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.

Схема электропитания разряда в режиме одиночных импульсов позволяет получать общий ток разряда амплитудой до 1.8 кА с длительностью 100 мкс на полувысоте. Конденсаторная батарея электропитания ускоряющего промежутка общей емкостью $C = 3 \mu\text{F}$ представляет собой 3 последовательных каскада из 3 параллельно соединенных между собой высоковольтных конденсаторов. Она заряжается от высоковольтного источника постоянного напряжения до $U = 80 \text{ kV}$. От конденсаторной батареи высокое напряжение по высоковольтному кабелю подается на плазменный эмиттер источника электронов через сопротивление $R = 3 \Omega\text{m}$. За время импульса тока пучка амплитудой 1 кА происходит разряд конденсаторной батареи на $\Delta U = 32 \text{ kV}$.

Расчетная геометрия внешнего магнитного поля, необходимого для транспортировки полученного электронного пучка, представлена на рис. 2. Такая конфигурация магнитного поля обеспечивает сжатие пучка при его формировании и позволяет транспортировать его до коллектора с минимальными потерями тока на трубе дрейфа. 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 замыкаются в основном на трубу дрейфа и эмиссионный электрод, в то время как низкоэнергетические электроны движутся вдоль силовых линий магнитного поля и уходят на коллектор.

Характерные осциллограммы тока дугового разряда I_d , тока в ускоряющем промежутке I_e , тока трубы дрейфа I_t и тока коллектора I_c при давлении рабочего газа 0.04 Па (Ar) и начальном ускоряющем напряжении 70 кВ, а также зависимость тока в ускоряющем промежутке от величины ускоряющего напряжения, приведены на рис. 3, а, б. Слабую

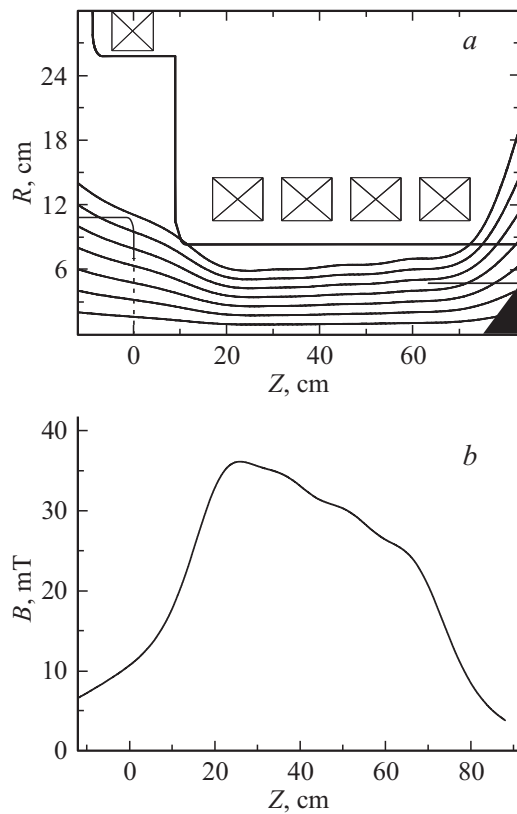


Рис. 2. Конфигурация магнитного поля вблизи эмиссионной сетки, в ускоряющем промежутке и трубе дрейфа (а) и расчетные значения величины магнитного поля вдоль оси транспортировки электронного пучка (б). $Z = 0$ соответствует положению эмиссионной сетки.

зависимость тока пучка от величины ускоряющего напряжения можно объяснить ограниченной током разряда эмиссионной способностью плазменного катода. При начальном напряжении $U_a = 80 \text{ kV}$ и амплитуде тока пучка 1 kA на коллекторе выделялась энергия около 3.5 kJ , что хорошо согласуется с ее расчетным значением, и фиксировался автограф пучка в виде оплавления диаметром около 50 mm .

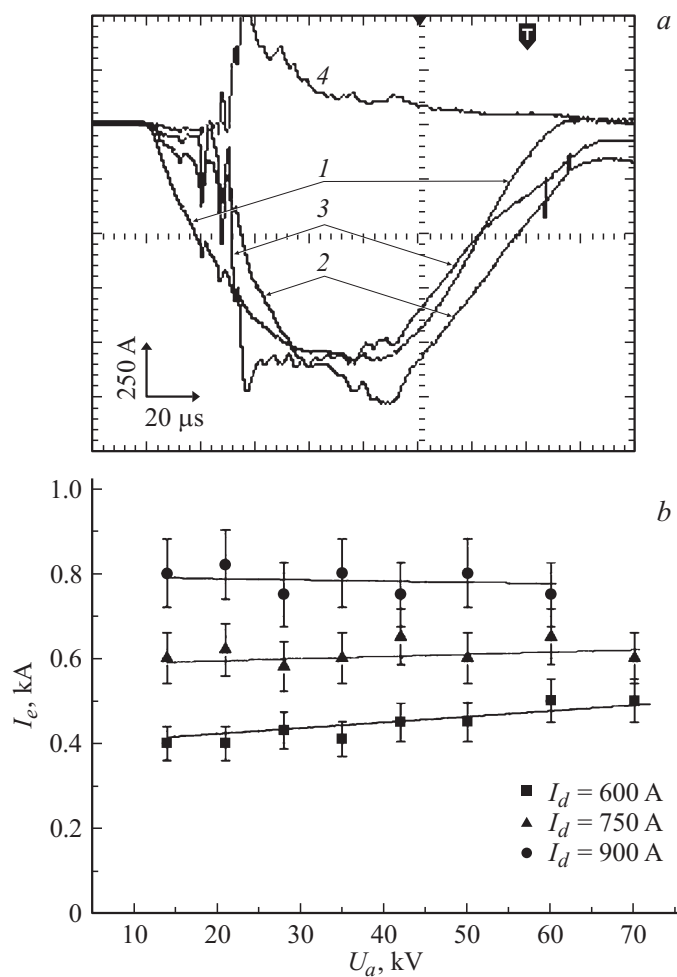


Рис. 3. Характерные осциллограммы токов: 1 — ток разряда I_d ; 2 — ток ускоряющего промежутка I_e ; 3 — ток коллектора I_c ; 4 — ток трубы дрейфа I_t при начальном ускоряющем напряжении $U_a = 70$ kV и давлении рабочего газа (Ar) $4 \cdot 10^{-2}$ Pa (a) и зависимость тока в ускоряющем промежутке I_e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

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

Список литературы

- [1] Коваль Н.Н., Окс Е.М., Протасов Ю.С., Семашко Н.Н. Эмиссионная электроника. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 596 с.
- [2] Goebel D.M., Schumacher R.W., Watkins R.M. // Proc. Conf. of 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., Kutkuchekov V., Rovenskikh A., Sinitsky S., Trunev Yu., Yarovoy V. // Fusion Science and Technology. 2011. V. 59. N 1. P. 67.
- [4] Григорьев С.В., Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Тересов А.Д. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 4. С. 23.
- [5] Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Щанин П.М. // ЖТФ. 1998. Т. 68. В. 1. С. 44.
- [6] Гушенец В.И., Коваль Н.Н., Щанин П.М. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 8. С. 12.