

12

Способ комбинированного управления электронным пучком в источнике с многодуговым сеточным плазменным эмиттером

© М.А. Мокеев¹, В.Н. Девятков¹, Д.А. Горьковская¹, М.С. Воробьев^{1,2}, А.А. Гришков¹, Н.Н. Коваль¹, Р.А. Картавцов¹

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: maks_mok@mail.ru

Поступило в Редакцию 11 ноября 2025 г.

В окончательной редакции 25 ноября 2025 г.

Принято к публикации 28 ноября 2025 г.

Предложен и реализован принцип действия источника электронов с многодуговым сеточным плазменным эмиттером, позволяющий регулировать ток электронного пучка в течение импульса субмиллисекундной длительности путем одновременной модуляции амплитуды тока дугового разряда и межсеточного напряжения за счет введения дополнительной сетки, перекрывающей торец полого анода и обеспечивающей изменение высоты потенциального барьера для плазменных электронов. Предложенный способ управления позволяет расширить диапазон регулировки тока электронного пучка на четыре порядка.

Ключевые слова: дуговой разряд, дуга низкого давления, плазменный катод, электронный пучок, сеточное управление, источник электронов.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.06.62463.20568

Задача расширения диапазона параметров генерируемых электронных пучков не теряет своей актуальности и востребованности в приложениях, связанных с модификацией поверхности различных материалов за счет непрерывного или импульсного нагрева поверхности материалов и изделий [1,2]. Импульсные электронные пучки для таких приложений являются наиболее эффективным инструментом, позволяющим реализовать как кратковременные высокоэнергетические воздействия (плавление, легирование), так и режимы с предварительным нагревом или удержанием температуры поверхности образца, направленные на изменение морфологии или устранение внутренних напряжений без разрушения структуры поверхности [3–5]. Однако возможности импульсных электронных пучков при низких рабочих давлениях остаточного газа (10–50 мПа) с постоянной амплитудой тока (мощностью пучка) существенно ограничены рядом физических свойств модифицируемых материалов, а именно теплопроводностью, термостойкостью, электрическими и прочими свойствами.

В работах [5,6] было показано, что для реализации требуемых высокоэнергетических воздействий для модификации поверхности различных материалов при использовании источников с плазменным катодом на основе дугового разряда можно управлять мощностью электронного пучка в течение его генерации в субмиллисекундном диапазоне длительностей импульсов за счет модулированного управления током дугового разряда. Однако такой подход не позволяет генерировать слаботочные электронные пучки, которые необходимы для предварительного плавного нагрева и очистки поверхности материала. Это ограничено минимальным

током дугового разряда, обычно составляющим единицы ампер.

Снижение амплитуды тока электронного пучка и его мощности может быть достигнуто за счет использования дополнительного сеточного электрода, формирующего потенциальный барьер для плазменных электронов, величина которого самосогласованно определяется протекающим током [7,8]. В представленной работе рассматривается двухсеточная система, разность потенциалов в которой (межсеточное напряжение) может изменяться в течение единого импульса.

В работе [9] было показано, что при использовании источника электронов с плазменным катодом на основе одной дуги низкого давления возможна организация так называемого комбинированного способа управления мощностью электронного пучка, включающего два описанных способа регулировки тока пучка. Такое сочетание обеспечивает возможность модулировать ток электронного пучка в широком диапазоне в пределах одного импульса, что открывает перспективы для модификации поверхности различных материалов с контролируемой скоростью ввода энергии в поверхность твердого тела. Целью настоящей работы является дальнейшее расширение диапазона мощности электронного пучка в источнике с многодуговым плазменным катодом с комбинированной регулировкой тока пучка.

На рис. 1 представлена схема источника электронов с многодуговым плазменным эмиттером, имеющего сеточное управление током электронного пучка. Источник электронов включает многокатодный узел, систему электропитания, дополнительную мелкоструктурную сетку, источник опорного и модулированного напряжения.

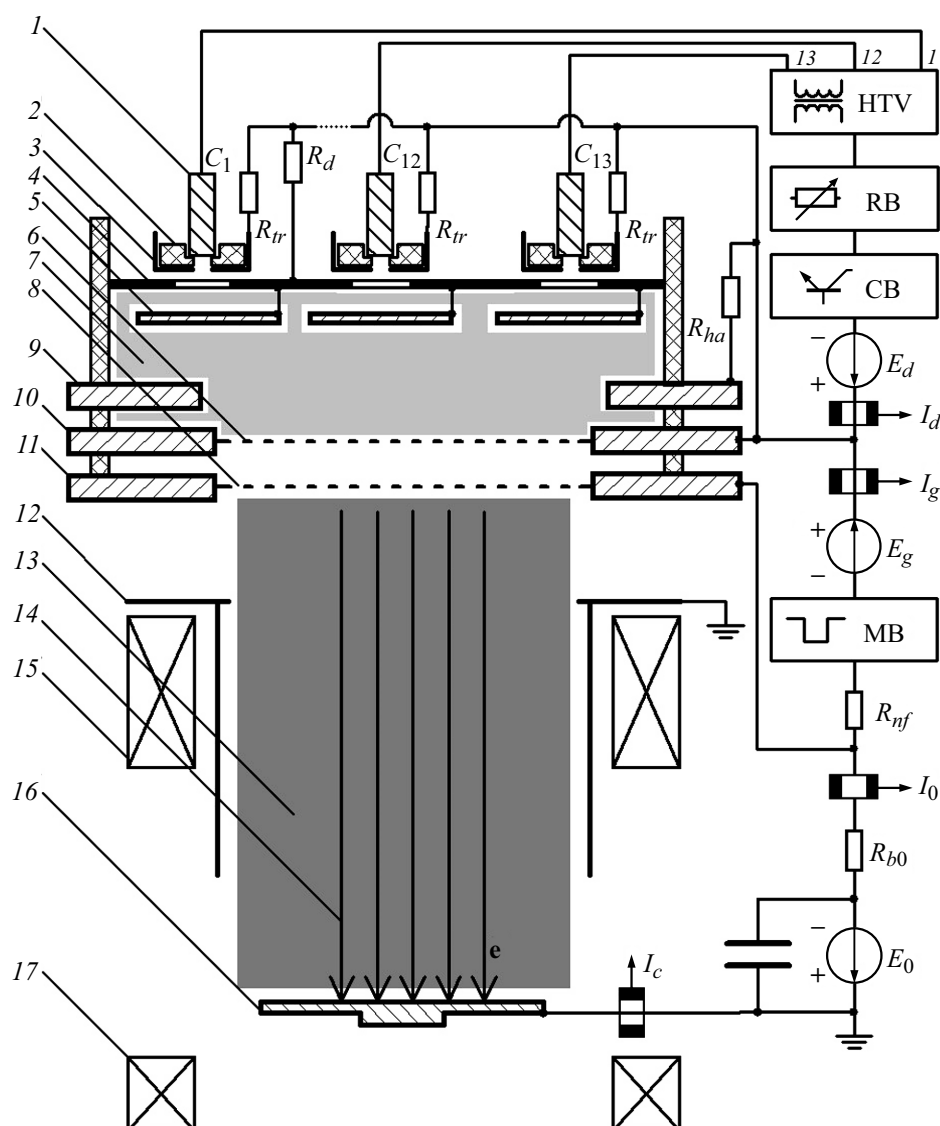


Рис. 1. Схема многодугового источника электронов с сеточным управлением. 1 — катод, 2 — изолятор, 3 — поджигающий электрод, 4 — диафрагма, 5 — перераспределяющий электрод, 6 — эмиссионная сетка, 7 — эмиссионная (катодная) плазма, 8 — управляющая сетка, 9 — промежуточный анод, 10 — анод, 11 — дополнительный анод, 12 — извлекающий электрод, 13 — пучковая (анодная) плазма, 14 — электронный пучок, 15, 17 — магнитные катушки, 16 — коллектор.

Принцип работы основных узлов многодугового источника электронов подробно описан в работе [10]. Отбор электронов из плазменного эмиттера осуществляется под действием постоянного приложенного ускоряющего напряжения от источника E_0 через ячейки эмиссионной сетки 6 и ячейки управляющей сетки 8, расположенной на анодном электроде 10. Ускоряющее напряжение прикладывается между электродом 11 и заземленными электродами 12 (извлекающий электрод, совмещенный с трубой дрейфа) и коллектором 16. Извлечение и ускорение электронов приводят к формированию анодной плазмы 13, граница которой открыта, подвижна и самосогласованно устанавливается вблизи управляющей сетки 8. Электронный пучок 14 транспортируется до коллектора на расстояние около 600 мм в поле со-

ноидов. При протекании тока в источнике электронов происходит разрядка конденсаторной батареи, формирующей ускоряющее напряжение.

Для управления током электронного пучка 14 как с помощью модуляции дугового разряда, так и с помощью сеточного управления торец полого анода 10 был дополнительно перекрыт управляющей сеткой 8. Диаметры эмиссионной и управляющей сеток 85 мм, размер ячеек 0.14×0.14 мм. Обе сетки выполнены из нержавеющей стали. Система электропитания дугового разряда представляет собой заряженную емкость, которая разряжается через блок резисторов RB, сопротивление которых можно динамически изменять в течение импульса тока разряда за счет включения соответствующих силовых транзисторов в коммутационном бло-

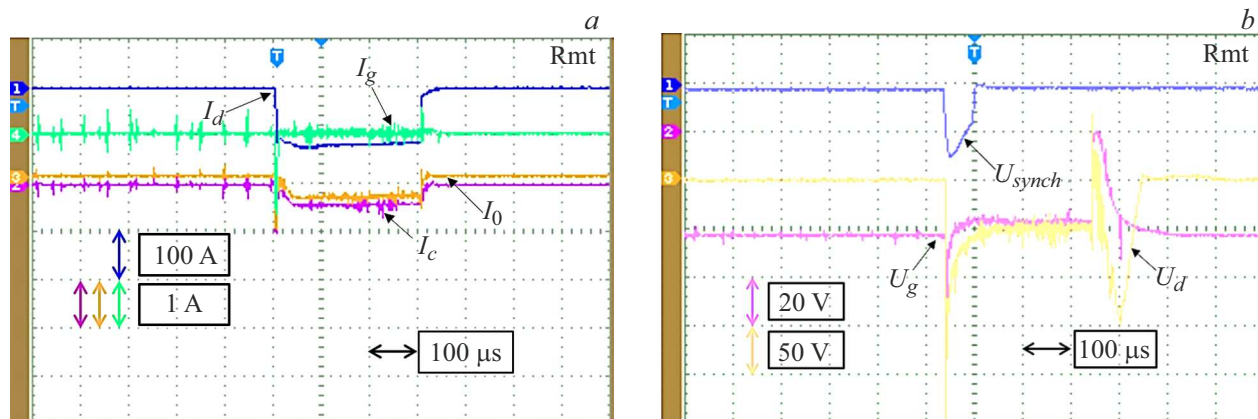


Рис. 2. Характерные осциллограммы токов (сигнал инвертирован) (а) и напряжений в режиме записания при постоянной амплитуде тока I_d (b). Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

ке СВ. Между сетками последовательно подключено два источника: источник опорного напряжения E_g и источник управляющего напряжения МВ. Источник опорного напряжения представляет собой блок конденсаторных батарей, заряжаемых через умножитель напряжения от регулируемого автотрансформатора, который обеспечивает возможность плавного регулирования выходного напряжения в диапазоне от 0 до -60 В. Источник модулированного напряжения МВ представляет собой набор емкостных накопителей, к каждому из которых подключен IGBT-модуль. Как и в случае с амплитудной и широтной модуляцией тока дугового разряда, источник модулированного напряжения позволяет осуществлять амплитудную модуляцию напряжения между эмиссионной сеткой 6 и управляющей сеткой 8. В данном источнике электропитания содержится четыре пары ключ–конденсатор, тем самым имеется 16 вариаций амплитуды напряжения смещения. Амплитудная дискретность составляет 5 В, а минимальная временная дискретность — $10 \mu\text{s}$.

При увеличении отрицательного напряжения смещения на управляющей сетке создается потенциальный барьер, препятствующий прохождению электронов через ячейки сетки в ускоряющий промежуток [11,12]. Источник модулированного напряжения смещения работает в импульсном режиме и имеет обратную полярность по отношению к источнику опорного напряжения. Управление транзисторами блока МВ позволяет формировать импульсы напряжения, чтобы компенсировать разность потенциалов между эмиссионной и управляющей сетками. Таким образом, на управляющей сетке временно снижается потенциальный барьер, а количество эмитирующих электронов увеличивается. В зависимости от величины опорного напряжения и амплитуды импульса смещения реализуется возможность расширения диапазона регулировки тока в ускоряющем промежутке до сотен миллиампер в течение единого импульса субмиллисекундной длительности.

На рис. 2 представлены осциллограммы токов (сигнал инвертирован) и напряжений, демонстрирующие возможность генерации электронного пучка с током $I_0 = 400$ мА при токе дугового разряда $I_d = 120$ А. Параметры эксперимента: давление остаточного газа $p(\text{Ar}) = 20$ мПа, ускоряющее напряжение $U_0 = 15$ кВ, амплитуда магнитного поля в области эмиттера $B_e = 30$ мТ, в области ускоряющего промежутка $B_g = 22$ мТ, в области коллектора $B_c = 110$ мТ, длительность импульса $\tau = 300 \mu\text{s}$. Измерение токов дугового разряда, токов на управляющей сетке, а также токов в ускоряющем промежутке и на коллекторе проводилось при помощи поясов Роговского. Напряжение между эмиссионной и управляющей сетками измерялось на шунтирующем резисторе при помощи осциллографа. Напряжение U_{synch} необходимо для синхронизации электрических сигналов источника электронов при использовании двух осциллографов.

Увеличение отрицательного напряжения между эмиссионной и управляющей сетками приводит к увеличению потенциального барьера для плазменных электронов, за счет чего происходит снижение тока в ускоряющем промежутке I_0 вплоть до почти полного прекращения эмиссии при $U_g \approx -(40-50)$ В (рис. 2, b). Эта величина U_g обусловлена максимальной энергией электронов, извлекаемых из эмиссионной плазмы, и согласуется с измерениями напряжения горения дугового разряда U_d на одном из катодов ($U_d \approx 40-50$ В). После начала импульса тока дугового разряда напряжение U_g изменяется с -45 до -35 В при помощи источника управляющего напряжения МВ, при этом ток в ускоряющем промежутке I_0 составляет 0.4 А.

На рис. 3 представлены характерные осциллограммы токов (сигнал инвертирован) и напряжений, демонстрирующие возможность управления током в ускоряющем промежутке при постоянном токе дугового разряда $I_d = 60$ А, давлении остаточного газа $p(\text{Ar}) = 20$ мПа, ускоряющем напряжении $U_0 = 15$ кВ, длительности им-

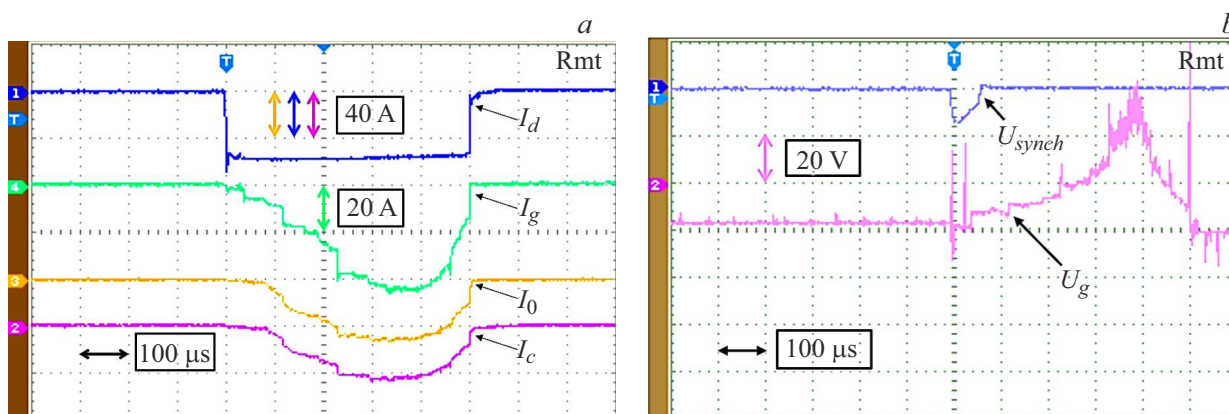


Рис. 3. Характерные осциллограммы токов (сигнал инвертирован) (а) и напряжений в режиме нарастающей мощности при постоянной амплитуде тока I_d (b). Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

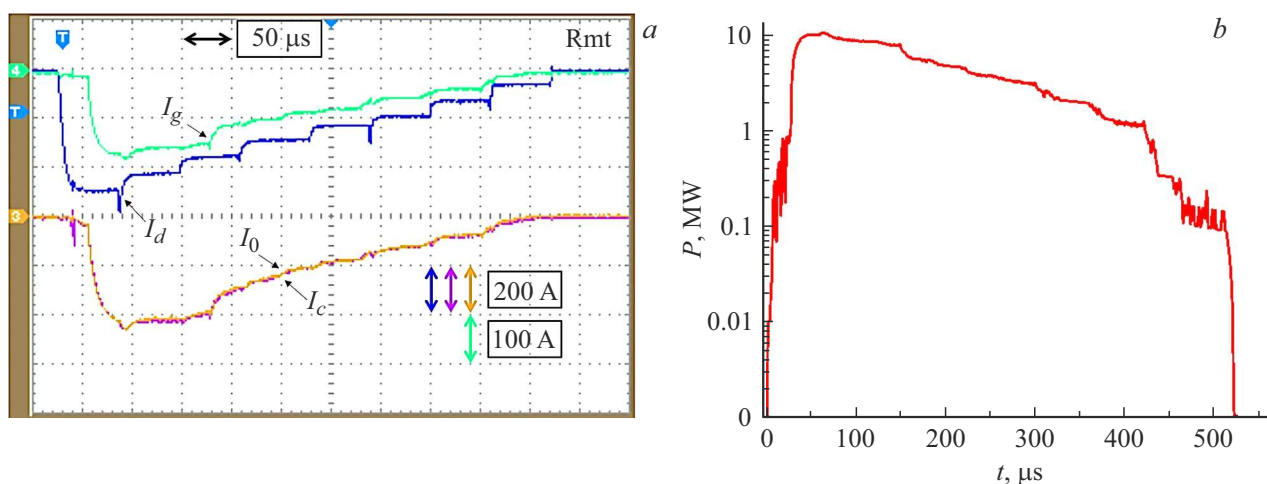


Рис. 4. Характерная осциллограмма токов (сигнал инвертирован) в режиме спадающей мощности (а) и график его мгновенной мощности (b). Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

пульса $\tau = 500 \mu\text{s}$ и аналогичных величинах магнитного поля.

После начала импульса тока дугового разряда источник модулированного напряжения изменяет напряжение между управляющей и эмиссионной сетками U_g с -20 до $+40 \text{ V}$, при этом происходит постепенный рост тока в ускоряющем промежутке I_0 . Данные осциллограммы подтверждают возможность модуляции тока в ускоряющем промежутке за счет изменения напряжения между эмиссионной и управляющей сетками, которое определяет величину потенциального барьера в течение импульса субмиллисекундной длительности.

На рис. 4 представлены осциллограмма спадающего тока электронного пучка в ускоряющем промежутке (а) и график его мгновенной мощности (b) в течение импульса. Опорное напряжение $U_g = -10 \text{ V}$, $U_0 = 25 \text{ kV}$, $p(\text{Ar}) = 30 \text{ mPa}$, $\tau = 500 \mu\text{s}$, величина магнитных полей аналогична предыдущим экспериментам. При комбинированном использовании источников тока дугового разряда и модуляции напряжения реализована возмож-

ность одновременной регулировки тока пучка за счет изменения как концентрации эмиссионной плазмы, так и величины потенциального барьера. Таким образом, демонстрируется возможность изменения мгновенной мощности от 0.1 до 10 MW в течение единого импульса субмиллисекундной длительности.

Реализованные в работе новые режимы генерации модулированного электронного пучка, амплитуда тока которого может изменяться на четыре порядка ($0.4\text{--}400 \text{ A}$) в течение единого импульса субмиллисекундной длительности, открывают перспективы его использования для решения задач в области материаловедения, в частности модификации поверхности керамических материалов.

Финансирование работы

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-69-00074).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.В. Белый, А.С. Калиниченко, О.Г. Девойно, В.А. Кукареко, *Инженерия поверхностей конструкционных материалов с использованием плазменных и пучковых технологий* (Беларуская навука, Минск, 2017).
- [2] Л.В. Беляев, Н.С. Довбыш, А.В. Жданов, *Технология обработки концентрированными потоками энергии* (Изд-во ВлГУ, Владимир, 2022).
- [3] Н.Н. Коваль, Е.М. Окс, Ю.С. Протасов, Н.Н. Семашко, *Эмиссионная электроника* (МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2009).
- [4] С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндель, П.М. Щанин, *Электронные пучки большого сечения* (Энергоатомиздат, М., 1984).
- [5] В.И. Шин, М.С. Воробьёв, П.В. Москвин, В.Н. Девятков, В.В. Яковлев, Н.Н. Коваль, М.С. Торба, Р.А. Картавцов, С.А. Воробьёв, Изв. вузов. Физика, **65** (11), 176 (2022). DOI: 10.17223/00213411/65/11/176 [V.I. Shin, M.S. Vorobyov, P.V. Moskvina, V.N. Devyatkov, V.V. Yakovlev, N.N. Koval, M.S. Torba, R.A. Kartavtsov, S.A. Vorobyov, Russ. Phys. J., **65** (11), 1979 (2023). DOI: 10.1007/s11182-023-02859-7].
- [6] Д.А. Шпанов, П.В. Москвин, Е.А. Петрикова, Ю.Ф. Иванов, М.С. Воробьёв, Materials. Technologies. Design, **6** (2), 129 (2024). DOI: 10.54708/26587572_2024_6217129
- [7] Е.М. Окс, *Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения* (Изд-во науч.-техн. лит., Томск, 2005).
- [8] А.П. Семенов, *Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером* (Наука, Екатеринбург, 1993).
- [9] V.I. Shin, M.S. Vorobyov, P.V. Moskvina, V.N. Devyatkov, N.N. Koval, M.A. Mokeev, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., **87** (Suppl. 2), S324 (2023). DOI: 10.1134/s1062873823704804
- [10] В.Н. Девятков, М.А. Мокеев, М.С. Воробьёв, Н.Н. Коваль, П.В. Москвин, Р.А. Картавцов, С.Ю. Дорошкевич, М.С. Торба, Письма в ЖТФ, **50** (19), 25 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.19.58652.19995 [V.N. Devyatkov, M.A. Mokeev, M.S. Vorobyev, N.N. Koval, P.V. Moskvina, R.A. Kartavtsov, S.Yu. Doroshkevich, M.S. Torba, Tech. Phys. Lett., **50** (10), 20 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.10.59688.19995].
- [11] В.И. Гушенец, А.С. Бугаев, Е.М. Окс, Изв. вузов. Физика, **60** (9), 49 (2017). [V.I. Gushenets, A.S. Bugaev, E.M. Oks, Russ. Phys. J., **60** (9), 1515 (2018). DOI: 10.1007/s11182-018-1244-6].
- [12] В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовник, Е.М. Окс, Ю.Г. Юшков, *Форвакуумные плазменные источники электронов* (Изд-во Томск. ун-та, Томск, 2014).