

04.1;12.1

## Электронный источник с многодуговым плазменным катодом для генерации модулированного пучка субмиллисекундной длительности

© В.Н. Девятков, М.А. Мокеев, М.С. Воробьев, Н.Н. Коваль, П.В. Москвин,  
Р.А. Картавцов, С.Ю. Дорошкевич, М.С. Торба

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: maks\_mok@mail.ru

Поступило в Редакцию 17 мая 2024 г.  
В окончательной редакции 4 июня 2024 г.  
Принято к публикации 5 июня 2024 г.

Представлены результаты исследования генерации модулированного электронного пучка в системе источника электронов с многодуговым сеточным плазменным катодом и плазменным анодом с открытой границей плазмы. По сравнению с одноканальной системой с перераспределяющим эмиссионную плазму электродом многодуговая система позволяет не только увеличить диаметр генерируемого электронного пучка, но и эффективно управлять распределением плотности энергии пучка за счет раздельной регулировки токов каналов. Разрядная система также обеспечивает возможность управления мощностью пучка в течение импульса тока субмиллисекундной длительности за счет формирования формы и амплитуды импульса разрядного тока.

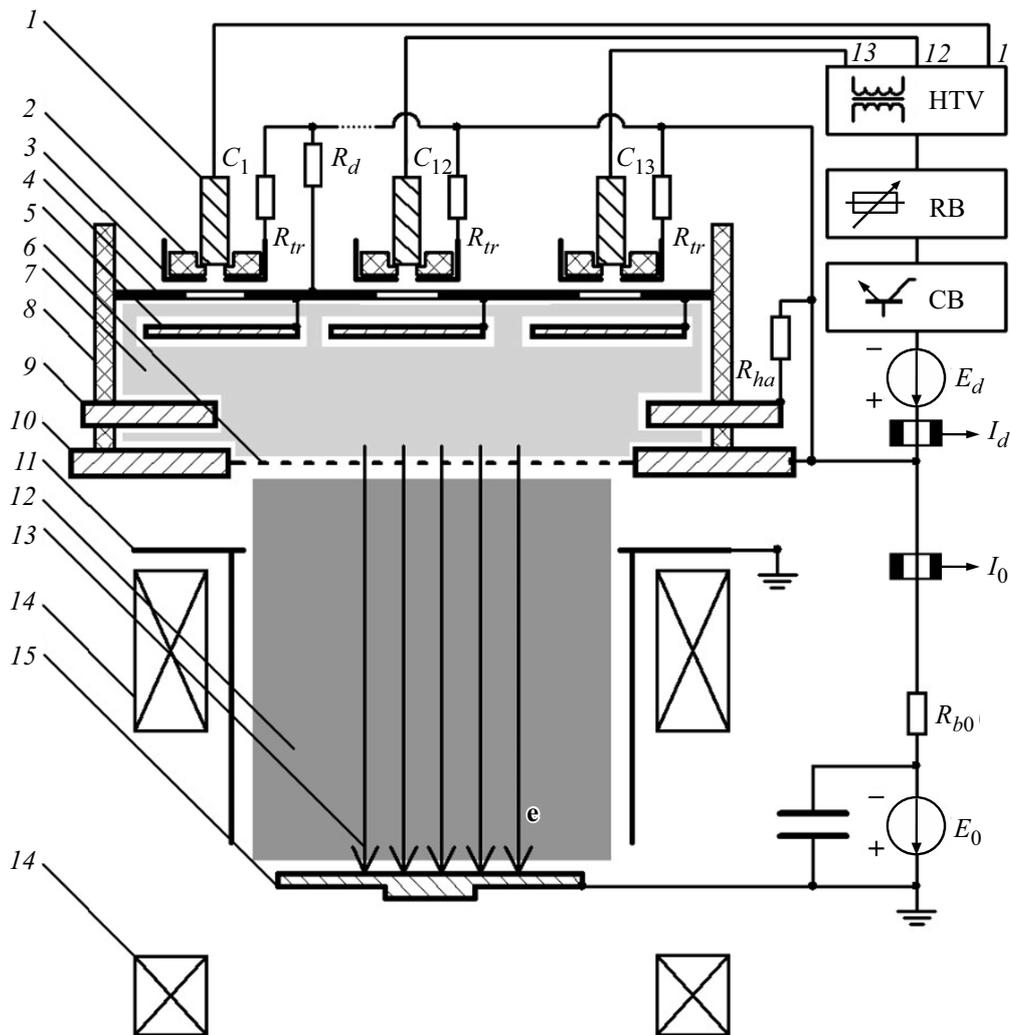
**Ключевые слова:** дуговой разряд, плазменный катод, источник электронов, открытая граница плазмы, модулированный электронный пучок.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.19.58652.19995

Для генерации интенсивных (с токами субкилоамперного уровня) электронных пучков и создания для этого эмиссионной плазмы в плазменных катодах (ПК) источников электронов широко используются дуговые разряды низкого давления [1–3]. Они позволяют реализовать генерацию эмиссионной плазмы в разрядной системе ПК в широком диапазоне давлений рабочего газа и амплитуды тока разряда, которая может достигать значений в сотни ампер даже в случае одиночного катода [4–7] и уровня нескольких килоампер при использовании многокатодных разрядных систем [8–11]. Одним из условий использования в разрядной системе ПК сильноточного дугового разряда является обеспечение стабильного инициирования катодного пятна (пятен). В разработанном плазменном эмиттере инициирование катодных пятен на 13 катодах, 12 из которых расположены по окружности диаметром 84 мм и один (дополнительный) в центре эмиттера, реализуется пробоем по поверхности диэлектрика. В этом случае не требуется перепада давления в разрядной системе и одновременное инициирование пятен может быть достигнуто при сравнительно простой одноканальной системе напуска рабочего газа, что позволяет создавать масштабируемые разрядные системы ПК с большим количеством независимых катодных узлов (многодуговые разрядные системы). Независимая работа нескольких катодных узлов усложняет систему электропитания разрядной системы ПК, однако использование современной элементной базы и оптимизация схем электропитания могут позволить упростить создание многоканальной дуговой разрядной системы, которая имеет хороший потенциал как с точки зрения создания ПК с большой площадью эмиссион-

ной поверхности, так и с точки зрения оперативного управления распределением плотности тока пучка по его сечению.

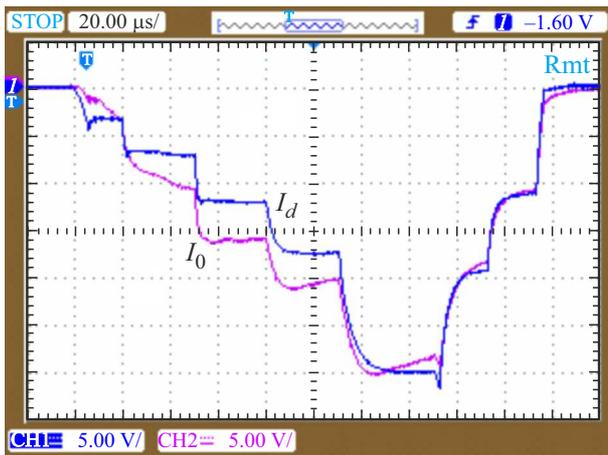
ПК с многодуговой разрядной системой входит в состав электронного источника, схема которого представлена на рис. 1. Инициирование катодного пятна на каждом катоде 1 происходит при электрическом пробое по поверхности изолятора 2 между катодом 1 и поджигающим электродом 3. Электроды 3, так же как токоперераспределяющие электроды 5 и промежуточный анод 9, подключены к анодному электроду 10, являющемуся общим анодом дуговых разрядов, через соответствующие сопротивления  $R_{tr}$ ,  $R_d$  и  $R_{ha}$ , которые обеспечивают переключение основного тока разряда на анодный электрод 9. Дополнительный электрод 4 совместно с электродом 5 помимо функции перераспределения тока разряда обеспечивает частичную стабилизацию тока в ускоряющем промежутке за счет введения отрицательной обратной связи по ионной компоненте тока, поступающей из ускоряющего промежутка в эмиттер через ячейки эмиссионной сетки [12]. Характерные размеры ПК: внутренний диаметр изолятора 8 — 125 мм, расстояние от катодов до эмиссионной сетки 6 — 80 мм, диаметр эмиссионной сетки — 85 мм, размер ячеек сетки (в свету)  $0.12 \times 0.12$  мм, толщина перемычки 0.09 мм. Отбор электронов из ПК осуществляется через ячейки эмиссионной сетки 6, расположенной на анодном электроде 10, под действием постоянного ускоряющего напряжения от источника  $E_0$  с накопительной высоковольтной конденсаторной батареей емкостью 6 мкФ. Ускоряющее напряжение прикладывается между эмиссионным электродом 10 и заземленными электродами



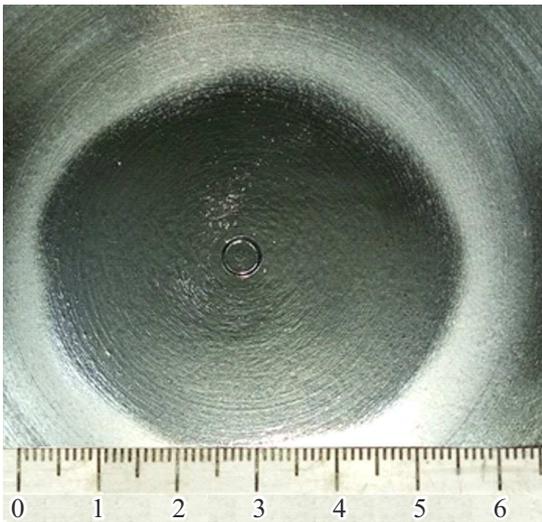
**Рис. 1.** Схема модернизированного источника „СОЛО“ с многодуговой разрядной системой. 1 — катод, 2 — изолятор, 3 — поджигающий электрод, 4 — дополнительный электрод, 5 — перераспределяющий электрод, 6 — эмиссионная сетка, 7 — катодная плазма, 8 — изолятор, 9 — промежуточный анод, 10 — анод, 11 — заземленный извлекающий электрод, 12 — анодная (пучковая) плазма, 13 — электронный пучок, 14 — соленоид, 15 — коллектор.

(извлекающий электрод, совмещенный с трубой дрейфа, 11 и коллектор 15). Экстракция и ускорение электронов при давлении рабочего газа  $p(\text{Ar}) = (1-5) \cdot 10^{-2}$  Па приводят к наработке плазмы в пространстве транспортировки электронного пучка и формированию так называемой анодной пучковой плазмы, граница которой открыта, подвижна и самосогласованно устанавливается вблизи эмиссионной сетки. Пучок транспортируется до коллектора 15 на расстояние около 600 мм в поле соленоидов 14. Для реализации возможности управления мощностью электронного пучка с целью обеспечения контролируемой скорости ввода энергии в поверхность обрабатываемого изделия и формирования в ней требуемого температурного поля [13] разработанная система электропитания многодугового ПК позволяет генерировать амплитудно- и широтно-модулированный ток дугового разряда, регулировка которого может осуществ-

ляться непосредственно в течение импульса тока субмиллисекундной длительности. Система электропитания разряда в эквиваленте 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 блоке CB. Инициирование дугового разряда осуществляется от блока поджига HTV. На рис. 2 приведены характерные осциллограммы модулированного тока разряда и тока в ускоряющем промежутке, демонстрирующие возможность управления мощностью электронного пучка в такой системе в течение импульса субмиллисекундной длительности. Особенностью генерации пучка в такой системе является необходимость работать в относительно узком диапазоне давлений рабочего газа, в котором, с одной стороны, будет происходить быстрая наработка



**Рис. 2.** Характерные оциллограммы модулированных тока дугового разряда ( $I_d$ ) и тока в ускоряющем промежутке ( $I_0$ ) при начальном ускоряющем напряжении 15 кВ, давлении  $p(\text{Ar}) = 4 \cdot 10^{-4}$  Торр. Масштаб: 100 А/див, 20 мкс/див.



**Рис. 3.** Автограф пучка при оплавлении поверхности коллектора, выполненного из титана, при плотности энергии пучка  $\sim 18 \text{ Дж/см}^2$ .

плазмы в пространстве транспортировки пучка, что обеспечит компенсацию пространственного заряда пучка и образование плазменного анода, а с другой — сохраняется достаточная электрическая прочность ускоряющего промежутка. Работа в плазмонаполненном режиме определяет значительную долю ионов в полном токе ускоряющего промежутка, которая меняется в течение импульса и определяет наряду с током разряда  $I_d$  амплитуду полного тока пучка  $I_0$ .

В экспериментах [14,15] было показано, что для получения на коллекторе равномерного распределения плотности энергии по сечению пучка необходимо формировать определенный профиль плотности тока эмиссии, который зависит от величины ведущего магнит-

ного поля, амплитуды тока пучка, давления рабочего газа, ускоряющего напряжения и пр. Зачастую такая многопараметрическая зависимость приводит к необходимости обеспечения минимума концентрации в центре эмиссионной области. В данной разрядной системе это достигается коррекцией плотности плазмы в приосевой области ПК дополнительным центральным токовым каналом. При генерации пучка без подключения центрального катода с его погружением в достаточно сильное магнитное поле ( $> 0.05 \text{ мТл}$ ) может формироваться пучок, оставляющий на коллекторе кольцевые автографы. При коррекции плотности плазмы центральным катодом был получен достаточно равномерный автограф пучка диаметром до 50 мм при оплавлении коллектора, выполненного из титана. Также на рисунке можно наблюдать зону видимого воздействия пучка диаметром до 60 мм (рис. 3).

Созданная многодуговая разрядная система, сняв ряд ограничений одноканальной системы с каналом контрагирования разряда, позволила показать возможность масштабирования разрядной системы ПК на основе дугового разряда низкого давления. По сравнению с одноканальной системой с перераспределяющим электродом большого размера многокатодная система за счет перераспределения тока дуги между катодами позволяет не только увеличить диаметр генерируемого электронного пучка, но и более эффективно управлять начальным и соответственно конечным (после транспортировки в продольном магнитном поле) распределением плотности энергии по сечению пучка за счет отдельной регулировки тока катодов. В экспериментах продемонстрированы новые режимы генерации модулированного пучка с энергией электронов до 25 кэВ, током до 700 А и длительностью импульсов до 150 мкс, которую можно увеличить при снижении мощности пучка. Генерируемый электронным источником пучок может использоваться в экспериментах по электронно-пучковой модификации поверхности материалов и изделий путем импульсного нагрева тонкого (единицы-десятки микрон) поверхностного слоя вплоть до его расплава и последующего сверхбыстрого ( $\sim 10^7 \text{ К/с}$ ) остывания за счет теплопроводности основного материала с целью контролируемого изменения функциональных и эксплуатационных свойств обрабатываемых материалов и изделий.

### Финансирование работы

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10015-П).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Н.Н. Коваль, Ю.Е. Крейндел, Г.А. Месяц, В.С. Толкачев, П.М. Щанин, Письма в ЖТФ, **9** (9), 568 (1983).
- [2] N.N. Koval, Yu.E. Kreindel, V.S. Tolkachev, P.M. Schanin, IEEE Trans. Electr. Insul., **20** (4), 735 (1985). DOI: 10.1109/TEI.1985.348898
- [3] Н.Н. Коваль, Е.М. Окс, Ю.С. Протасов, Н.Н. Семашко, Эмиссионная электроника (МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2009).
- [4] N.N. Koval, S.V. Grigoryev, V.N. Devyatkov, A.D. Teresov, P.M. Schanin, IEEE Trans. Plasma Sci., **37** (10), 1890 (2009). DOI: 10.1109/TPS.2009.2023412
- [5] V.N. Devyatkov, N.N. Koval, P.M. Schanin, V.P. Grigoryev, T.V. Koval, Laser Part. Beams, **21** (2), 243 (2003). DOI: 10.1017/S026303460321212X
- [6] А.В. Казаков, В.А. Бурдовицин, А.В. Медовник, Е.М. Окс, Приборы и техника эксперимента, № 6, 50 (2013). DOI: 10.7868/S0032816213060049 [A.V. Kazakov, V.A. Burdovitsin, A.V. Medovnik, E.M. Oks, Instrum. Exp. Tech., **56** (6), 680 (2013). DOI: 10.1134/S0020441213060043].
- [7] V. Burdovitsin, A. Kazakov, E. Oks, A. Medovnik, in 2018 28th Int. Symp. on discharges and electrical insulation in vacuum (ISDEIV) (IEEE, 2018), p. 739. DOI: 10.1109/DEIV.2018.8536988
- [8] М.С. Воробьёв, С.А. Гамермайстер, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, П.М. Щанин, Письма в ЖТФ, **40** (12), 24 (2014). [M.S. Vorob'ev, S.A. Gameraister, V.N. Devyatkov, N.N. Koval', S.A. Sulakshin, P.M. Shchanin, Tech. Phys. Lett., **40** (6), 506 (2014). DOI: 10.1134/S1063785014060261].
- [9] М.С. Воробьёв, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, Изв. вузов. Физика, **60** (8), 109 (2017). [M.S. Vorobyov, V.N. Devyatkov, N.N. Koval, S.A. Sulakshin, Russ. Phys. J., **60** (8), 1386 (2017). DOI: 10.1007/s11182-017-1226-0].
- [10] Ya.E. Krasik, J.Z. Gleizer, A. Krokmal, V.Ts. Gurovich, D. Yarmolich, J. Felsteiner, V. Bernshtam, V.I. Gushenets, Plasma Dev. Oper., **13** (1), 19 (2005). DOI: 10.1080/10519990512331320790
- [11] Ya.E. Krasik, J.Z. Gleizer, A. Krokmal, K. Chirko, A. Sayapin, J. Felsteiner, V. Bernshtam, V.I. Gushenets, Vacuum, **77** (4), 391 (2005). DOI: 10.1016/j.vacuum.2004.07.067
- [12] М.С. Воробьёв, П.В. Москвин, В.И. Шин, Т.В. Коваль, В.Н. Девятков, С.Ю. Дорошкевич, Н.Н. Коваль, М.С. Торба, К.Т. Ашурова, ЖТФ, **92** (6), 883 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.06.52519.14-22 [M.S. Vorobyov, P.V. Moskvin, V.I. Shin, T.V. Koval, V.N. Devyatkov, S.Yu. Doroshkevich, N.N. Koval, M.S. Torba, K.T. Ashurova, Tech. Phys., **67** (6), 747 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.06.54422.14-22].
- [13] M. Vorobyov, T. Koval, V. Shin, P. Moskvin, M.K.A. Tran, N. Koval, K. Ashurova, S. Doroshkevich, M. Torba, IEEE Trans. Plasma Sci., **49** (9), 2550 (2021). DOI: 10.1109/TPS.2021.3089001
- [14] V.N. Devyatkov, N.N. Koval, J. Phys.: Conf. Ser., **1393**, 012040 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1393/1/012040
- [15] V.N. Devyatkov, N.N. Koval, in 2020 7th Int. Congress on energy fluxes and radiation effects (EFRE) (IEEE, 2020), p. 160. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9241906