

ЭЛЕКТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ СЕРИИ «СОЛО» С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ НА ОСНОВЕ ДУГИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

М.С. Воробьев, Н.Н. Коваль, В.Н. Девятков,
П.В. Москвин, Р.А. Картавцов, М.А. Мокеев
Институт сильноточной электроники СО РАН,
пр. Академический 2/3, Томск 634055, Россия,
vorobyovms@opee.hcei.tsc.ru, koval@hcei.tsc.ru, vlad@opee.hcei.tsc.ru,
moskvin@opee.hcei.tsc.ru, kartavtsov@opee.hcei.tsc.ru, mokeevma@opee.hcei.tsc.ru

В работе представлены результаты многолетней разработки, создания и модернизации источников электронов серии «СОЛО», имеющих плазменный сеточный катод (СПК) различной конфигурации на основе дугового разряда низкого давления и плазменного анода с открытой границей плазмы, нарабатываемой как самим электронным пучком, так и вспомогательным разрядом. За более чем 25 лет параметры импульсного пучка были расширены от десятков ампер при длительности в десятки мкс до токов субкилоамперного уровня субмиллисекундной длительности, формируемых при энергии электронов в десятки кэВ и частоте следования импульсов в десятки имп./сек. Такие интенсивные низкоэнергетические пучки с диаметром 20-50 мм и плотностью энергии до 100 Дж/см² за импульс используются для модификации поверхности различных материалов и изделий с целью улучшения функциональных и эксплуатационных свойств, а также могут быть использованы для моделирования экстремальных тепловых нагрузок, например, на первую стенку дивертора термоядерного реактора и других применений.

Ключевые слова: дуговой разряд; плазменный катод; источник электронов; модификация поверхности.

ELECTRONIC SOURCES OF THE «SOLO» SERIES WITH A PLASMA CATHODE BASED ON A LOW-PRESSURE ARC

M.S. Vorobyov, N.N. Koval, V.N. Devyatkov, P.V. Moskvina, R.A. Kartavtsov, M.A. Mokeev
Institute of High Current Electronics SB RAS; 2/3 Akademicheskoy Ave., 634055 Tomsk, Russia

The paper presents the results of many years of development, creation and modernization of the SOLO series electron sources with a plasma grid cathode (PGC) of various configurations based on a low-pressure arc discharge and a plasma anode with an open plasma boundary generated by both the electron beam itself and an auxiliary discharge. For more than 25 years, the pulsed beam parameters have been expanded from tens of amperes with a duration of tens of μ s to subkiloampere currents of submillisecond duration formed at an electron energy of tens of keV and a pulse repetition rate of tens of imp./sec. Such intense low-energy beams with a diameter of 20-50 mm and an energy density of up to 100 J/cm² per pulse are used to modify the surface of various materials and products in order to improve their functional and operational properties, and can also be used to simulate extreme thermal loads, for example, on the first wall of a thermonuclear reactor divertor and other applications.

Keywords: arc discharge; plasma cathode; electron source; surface modification.

Введение

Одним из методов модификации поверхности материалов (металлы, сплавы, керамика, др.) с целью улучшения физико-механических и эксплуатационных свойств является воздействие на нее импульсным электронным пучком. Для получения пучка, пригодного для модификации поверхности материалов с независимой регулировкой его параметров (длительности импульсов t от десятков до

сотен мкс, амплитуды тока пучка I_b от десятков до сотен ампер, энергии электронов $E=5-25$ кэВ), практически безальтернативным вариантом является использование СПК на основе дугового разряда низкого давления [1, 2]. Целью данной работы является ретроспектива разработки источников электронов «СОЛО» и демонстрация их современных возможностей.

Результаты и обсуждение

Разработка источников с СПК, генерирующих электронный пучок в высоковольтном плазманаполненном диоде началась с создания источников [3, 4] на основе тлеющего и дугового разрядов, в которых для транспортировки интенсивного низкоэнергетического пучка с $t=10$ и $t=30$ мкс соответственно, было применено продольное магнитное поле (МП). На основе [4] был создан первый вариант источника «SOLO» и установки на его основе [5] с параметрами: $t=30$ мкс, $I_b=30-300$ А, $E=5-18$ кэВ, $f=1-10$ Гц. Дальнейшая модернизация электронного источника SOLO осуществлялась за счет СПК, и во многом за счет совершенствования источников электропитания (ИЭ). Современная элементная база позволила создать энергокомплекс [6], на основе которого позже удалось создать автоматизированную лабораторную установку [7] с управлением электронным источником и манипулятором с помощью ПК. Реализовано управление электронным пучком с независимой регулировкой параметров ($I_b=20-250$ А при $t=50-200$ мкс, $E=5-25$ кэВ, $f=0.3-20$ Гц).

Далее модификация «SOLO» шла за счет модернизации катодных узлов СПК [8, 9], схем ИЭ с переходом от разделительного трансформатора в цепи питания разряда к схемам ИЭ разряда под ускоряющим напряжением. В ИЭ была введена регулировка тока разряда в течение импульса.

МП влияет на разрядную систему СПК и на распределение плотности тока по сечению пучка после транспортировки. Для формирования начального распределения тока с СПК можно использовать СПЭ с одним катодным и одним перераспределяющим плазму электродом [9]. Однако такое решение не является универсальным. При росте проникающего в СПК магнитного поля ($\geq 50-100$ Гс), диаметра эмиссионной сетки (≥ 100 мм), I_b (сотни ампер) задача усложняется. Для управления распределением плотности эмиссионной плазмы в СПК можно также распределять разряд в

СПК по нескольким параллельным каналам [10] или использовать многодуговую разрядную систему [11], для которой был разработан специальный ИЭ, что позволило получить ток пучка до 700 А.

Разработанные ИЭ и СПК с одним или несколькими катодами дугового разряда источников «СОЛО» реализуют управление мощностью электронного пучка за счет модуляции разрядного тока во время генерации импульсов [11, 12, 13], что может быть важно для контролируемого ввода энергии пучка в облучаемые материалы при модификации их поверхности [14].

Продолжает совершенствоваться метод введения отрицательной обратной связи по току в ускоряющем промежутке, нивелирующей выбросы тока пучка, основанный на введении специального электрода в пространство полого анода СПК. При росте тока пучка и, соответственно, росте тока ионов, поступающих на этот электрод из ускоряющего промежутка, происходит переключение на него части электронного тока дугового разряда равной или пропорциональной току ускоренных ионов, бомбардирующих этот специальный электрод, что снижает извлекаемый из СПК ток электронов [15]. Это ведет к частичному подавлению колебаний амплитуды тока пучка, снижению неоднородности плотности тока пучка и улучшению стабильности работы источников с СПК, а в частности, к их управляемости и воспроизводимости импульсов, а также повышению электрической прочности ускоряющего зазора.

Кроме этого, было показано, что использование поворота электронного пучка на 90° за счет специально создаваемого магнитного поля ведет к кратному уменьшению количества пробоев ускоряющего промежутка [16]. Также рост электрической прочности и кратное снижение электрических пробоев наблюдается при создании искусственного плазменного анода вспомогательным разрядом в скрещенных электрическом и магнитном полях [17].

Закключение

В работе кратко представлены основные шаги в проектировании и создании источников электронов серии СОЛО, которые в настоящее время отличаются рекордной совокупностью параметров генерируемого электронного пучка (табл. 1).

Табл. 1. Параметры электронного пучка

Ускоряющее напряжение, кВ	до 30
Ток пучка, А	до 700
Длительность импульса, мкс	до 1000
Частота следования импульсов, с ⁻¹	до 20
Диаметр пучка, мм	до 50
Плотность мощности пучка, кВт/см ²	до 100
Плотность энергии пучка, Дж/см ²	до 100

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект РНФ № 24-69-00074).

Библиографические ссылки

1. Коваль Н.Н., Окс Е.М., Протасов Ю.С., Семашко Н.Н. Эмиссионная электроника. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2009. 596 с.
2. Oks E. Plasma Cathode Electron Sources: Physics, Technology, Applications. WILEY-VCH; 2006. 171 p.
3. Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Щанин П.М. Электронный газонаполненный диод на основе тлеющего разряда *Журнал технической физики* 2001; 71(5): 20-24.
4. Devyatkov V.N., Koval N.N., Schanin P.M., Grigoryev V.P., Koval T.V. Generation and propagation of high-current low-energy electron beams. *Laser and Particle Beams* 2003; 21: 243-248.
5. Коваль Н.Н., Щанин П.М., Девятков В.Н., Толкачев В.С., Винтизенко Л.Г. Установка для обработки поверхности металлов электронным пучком. *ИТЭ* 2005; (1): 135-140.
6. Коваль Н.Н., Сочугов Н.С., Девятков В.Н., Григорьев С.В., Арсланов И.Р., Миков А.В., и др. Автоматизированный энергокомплекс для импульсной поверхностной обработки материалов электронным пучком. *Изв. ВУЗов. Физика* 2006; (8): 51-54.
7. Grigoriev S.V., Devyatkov V.N., Koval N.N., Teresov A.D. The Automated Installation for Surface Modification of Metal and Ceramic-Metal Materials and Products by Intensive Pulse Sub-Millisecond Electron Beam. Proc. 9th Intern. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk; 2008. P. 19-32.
8. Devyatkov V.N., and Koval N.N. Plasma Grid Cathodes Based on a Constricted Arc Discharge for Generating a Pulsed Intense Low-Energy Electron Beam in a Plasma-Filled Diode with a Longitudinal Magnetic Field. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 2019; 83(11): 1373-1376.
9. Devyatkov V.N., Koval N.N. Profile formation of emission current of grid plasma cathode in a longitudinal magnetic field. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019; 1393: 012040.
10. Девятков В.Н., Коваль Н.Н. Плазменные сеточные катоды на основе контрагированного дугового разряда для генерации импульсного интенсивного низкоэнергетического электронного пучка в плазмонаполненном диоде с продольным магнитным полем. В кн.: Труды VI международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника». Улан-Удэ: БНЦ; 2018. С.26-31.
11. Девятков В.Н., Мокеев М.А., Воробьев М.С., Коваль Н.Н., Москвин П.В., Картавцов Р.А. и др. Электронный источник с многодуговым плазменным катодом для генерации модулированного пучка субмиллисекундной длительности. *Письма в ЖТФ* 2024; 50(19): 25-28.
12. Воробьев М.С., Москвин П.В., Шин В.И. и др. Динамическое управление мощностью мегаваттного электронного пучка субмиллисекундной длительности в источнике с плазменным катодом. *Письма в ЖТФ* 2021; 47(10): 38-42.
13. Shin V.I., Vorobyov M.S., Moskvina P.V., Devyatkov V.N., Yakovlev V.V., Koval N.N., et al. Latitude and Amplitude Modulation of the Beam Current for Controlling its Power During a Submillisecond Pulse. *Russian Physics Journal* 2023; 65(11): 1979-1988.
14. Vorobyov M., Koval T., Shin V., Moskvina P., My Kim An Tran, Koval N., et al. Controlling the Specimen Surface Temperature During Irradiation With a Submillisecond Electron Beam Produced by a Plasma-Cathode Electron Source. *IEEE Transactions on Plasma Science* 2021; 49(9): 2550-2553.
15. Воробьев М.С., Москвин П.В., Шин В.И. и др. Отрицательная обратная связь по току в ускоряющем промежутке в источниках электронов с плазменным катодом. *ЖТФ* 2022; 92(6): 883-888.
16. Шин В. И., Москвин П. В., Воробьев М.С., Девятков В.Н., Дорошкевич С.Ю., Коваль Н.Н. Повышение электрической прочности ускоряющего зазора в источнике электронов с плазменным катодом. *Приборы и техника эксперимента* 2021; (2): 69-75.
17. Moskvina P.V., Devyatkov V.N., Vorobyov M.S., Shin V.I., Lopatin I.V., Koval N.N., et al. Electron beam generation in an arc plasma source with an auxiliary anode plasma. *Vacuum* 2021; 191(9): 110338.