

12

Использование жалюзийного перераспределяющего электрода в плазменном эмиттере электронов на основе дуги низкого давления

© П.В. Москвин, М.А. Мокеев, М.С. Воробьёв, Д.А. Горьковская, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, С.Ю. Дорошкевич, А.А. Гришков

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

E-mail: maks_mok@mail.ru

Поступило в Редакцию 18 февраля 2025 г.

В окончательной редакции 17 марта 2025 г.

Принято к публикации 17 марта 2025 г.

Представлены результаты генерации импульсного электронного пучка в источнике с плазменным эмиттером на основе дуги низкого давления с сеточной стабилизацией границы катодной плазмы и плазменным анодом с открытой границей плазмы при использовании перераспределяющего электрода специальной жалюзийной формы. Для потока ионов, поступающих в пространство плазменного эмиттера из анодной/пучковой плазмы, конструкция электрода позволяет реализовать близкую к нулевой геометрическую прозрачность, но в то же время ненулевую переменную геометрическую прозрачность для плазменных электронов разряда. Такая конструкция позволяет обеспечивать эффективный отбор электронов через эмиссионную сетку с возможностью дополнительной стабилизации интенсивного (десятки-сотни ампер) широкого (единицы-десятки cm^2) электронного пучка субмиллисекундной длительности при ускоряющих напряжениях до 15 kV.

Ключевые слова: дуговой разряд, сеточный плазменный эмиттер, источник электронов, перераспределяющий электрод, граница плазмы, стабилизация пучка, распределение плотности эмиссионного тока.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.12.60606.20288

Источники электронов с плазменным катодом [1] на основе дуги низкого давления являются эффективными устройствами, широко применяемыми в области термобработки материалов, в процессах пучковой полировки, нанесения функциональных покрытий и других технологических задачах, где требуется дозированный вклад энергии в материал с целью модификации его структуры и свойств [2]. Ключевыми преимуществами источников электронов с плазменным катодом являются их высокая плотность энергии, возможность независимой регулировки основных параметров источника (энергии электронов, токов и длительности пучка) в широком диапазоне, а также способность эффективно воздействовать на различные материалы, включая металлы, керамику и полимеры. Благодаря этому достигается значительное улучшение свойств поверхности материалов, что ведет к повышению срока службы изделий, выполненных из этих материалов [3].

Однако, несмотря на указанные преимущества, недостатком таких источников является малый диаметр электронного пучка, что затрудняет обработку больших площадей материалов и приводит к необходимости сканирования пучка по изделию. Кроме того, распределение плотности энергии по сечению пучка часто является гауссовым, что также приводит к неравномерной обработке поверхности материалов, ограничивая сферу возможных применений электронного пучка.

Среди наиболее распространенных способов решения обозначенных проблем можно отметить увеличение диаметра, а соответственно и площади эмиссионной сет-

ки [4], внедрение многодуговых систем [5] или использование перераспределяющих электродов специальной формы, улучшающих однородность пучка [6]. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки.

Увеличение диаметра эмиссионной сетки, а соответственно и диаметра электронного пучка до некоторых пределов, позволяет увеличить площадь эмиссии электронов, но чаще всего сопровождается снижением плотности эмиссионного тока. Преимуществом данного подхода является возможность его реализации без существенных изменений конструкции источника электронов. Однако с ростом эмиссионной площади неоднородность плотности эмиссионного тока также возрастает, что требует применения дополнительных мер по ее снижению, без которых стабильность и устойчивость работы источника электронов существенно ухудшаются [7].

Многодуговые системы предполагают использование нескольких катодов внутри единого сеточного плазменного эмиттера, которые зачастую располагаются по окружности, формируя перекрывающиеся плазменные потоки. Как результат, формируется относительно однородная эмиссионная плазма, ограниченная эмиссионной сеткой [5]. Это позволяет существенно увеличить диаметр пучка и реализовать равномерное распределение плотности тока за счет независимой регулировки тока на каждом катоде [8]. Недостатком такого метода является сложность конструкции плазменного эмиттера и систем его электропитания.

Использование электрода, перераспределяющего плазму в эмиттере, позволяет распределить

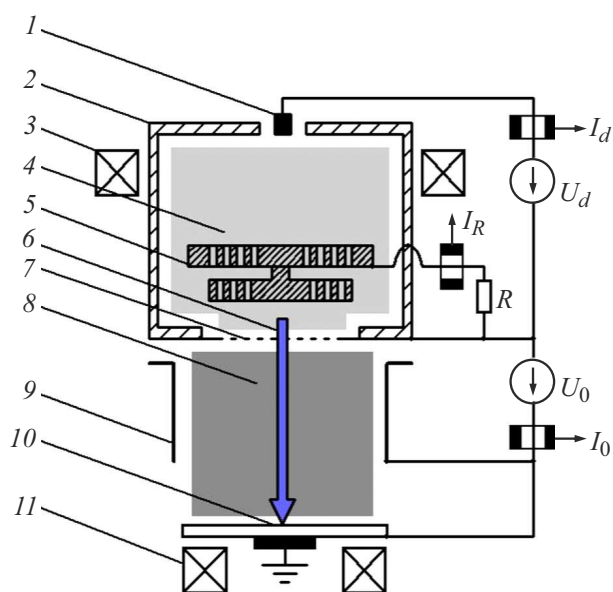


Рис. 1. Схема источника электронов. 1 — катод, 2 — анод, 3 — соленоид в эмиссионной области, 4 — катодная плазма, 5 — жалюзийный перераспределяющий электрод, 6 — электронный пучок, 7 — эмиссионная сетка, 8 — пучковая плазма, 9 — заземленный извлекающий электрод, 10 — коллектор, 11 — соленоид в области коллектора.

эмитируемые электроны на большую площадь. Этот подход обеспечивает значительное расширение пучка и может быть относительно легко интегрирован в существующие установки. Однако при больших размерах эмиттера и эмиссионной сетки такой подход становится нецелесообразным, поскольку может приводить к снижению плотности эмиссионного тока на оси системы.

Целью настоящей работы является увеличение диаметра электронного пучка со снижением неоднородности плотности тока, а соответственно и плотности энергии по его сечению, а также увеличение стабильности его генерации в источнике с плазменным эмиттером на основе импульсной одиночной дуги низкого давления за счет использования перераспределяющего электрода специальной жалюзийной формы.

Эксперименты проводились с использованием источника электронов с плазменным эмиттером на основе дуги низкого давления [9,10], схема которого представлена на рис. 1. При подаче напряжения источником U_d на поверхности катода 1 инициируется катодное пятно, что приводит к зажиганию дугового разряда низкого давления между катодом 1 и анодом 2 и наработке эмиссионной плазмы 4 в ведущем магнитном поле соленоида 3. Перераспределяющий электрод 5, конструкция которого приведена на рис. 2, имеет переменную геометрическую прозрачность для плазменных электронов, увеличивающуюся по радиусу электрода и обратно пропорциональную плотности тока эмиссии, измеренного в отсутствие данного электрода в системе плазменного эмиттера. При

подаче ускоряющего напряжения источником U_0 между анодом 2 и извлекающим электродом 9 из эмиссионной плазмы 4 происходит отбор электронов, которые проходят сквозь отверстия перераспределяющего электрода 5, формируя электронный пучок 6, ускоряются и транспортируются в ведущем магнитном поле соленоида 11 до коллектора 10. Анодная плазма 8 нарабатывается за счет ионизации рабочего газа электронным пучком 6 в трубе дрейфа. Генерация пучка 6 сопровождается формированием потока ускоренных ионов из анодной плазмы 8 в направлении плазменного эмиттера. Электрод 5 имеет жалюзийную форму, что позволяет обеспечить нулевую геометрическую прозрачность для ускоренного ионного потока и приводит к повышению стабильности генерации электронного пучка за счет усиления отрицательной обратной связи по ионному потоку [11], что достигается его полным перехватом электродом 5.

На рис. 3 приведены осциллограммы, полученные с использованием перераспределяющего электрода в форме цилиндра диаметром 65 мм, толщиной 5 мм из нержавеющей стали (а) и перераспределяющего электрода жалюзийной формы (б). На рисунках приведены осциллограммы ускоряющего напряжения U_0 , тока в ускоряющем промежутке I_0 , тока в цепи перераспределяющего электрода I_R и тока в цепи дугового разряда I_d . Масштаб: U_0 — 5 кВ/дел, I_0 — 40 А/дел, I_R — 4 А/дел, I_d — 40 А/дел, τ — 20 мкс/дел. Магнитное поле, создаваемое соленоидом в эмиссионной области, равно 50 мТ, в области коллектора — 60 мТ. Длительность импульса составляет ~ 150 мкс. При использовании цилиндрического перераспределяющего электрода на осциллограммах наблюдаются характерные всплески на фронте импульса тока на перераспределяющем электроде I_R , приводящие к всплескам тока в ускоряющем промежутке I_0 (рис. 3, а), в то время как при использовании электрода жалюзийной формы наблюдается меньшая амплитуда пульсаций тока при генерации электронного пучка (рис. 3, б), более устойчивое токопрохождение с несколько большей амплитудой тока и соответственно большей интегральной за импульс энергией электронного пучка.

На рис. 4 приведены распределения плотности энергии электронного пучка по сечению с помощью секционированного калориметра. Кривая 1 соответствует распределению плотности энергии при использовании перераспределяющего электрода в форме цилиндра, которое имеет существенную неоднородность по центру системы, связанную с неоднородностью плазмы в эмиссионной области. Диаметр электронного пучка на полувысоте плотности энергии при использовании цилиндрического электрода составляет 30 мм. Кривая 2 соответствует распределению плотности энергии при использовании предлагаемого жалюзийного электрода с самосогласованной отрицательной обратной связью; диаметр пучка на полувысоте плотности

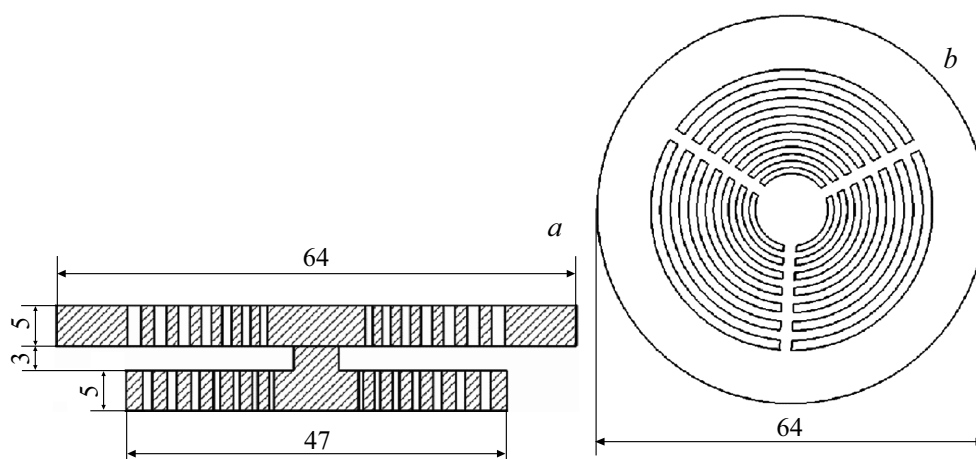


Рис. 2. Перераспределяющий электрод: a — вид сбоку, b — вид сверху.

энергии равен 40 мВ. Кривая 3 соответствует распределению плотности энергии без перераспределяющего электрода.

Из представленных рисунков видно, что предлагаемый способ генерации электронного пучка при использовании описанного перераспределяющего электрода с отличной от нуля геометрической прозрачностью для быстрых и плазменных электронов позволяет получить более однородное распределение плотности мощности электронного пучка на коллекторе. Механизм перераспределения связан с тем, что быстрые и плазменные электроны в отличие от ионов могут проходить сквозь отверстия в электроде в скрещенных электрическом и магнитном полях.

Это позволяет перейти к большим токам дугового разряда, не провоцируя электрический пробой ускоряющего промежутка, чаще всего обусловленный нарушением слоевой/сеточной стабилизации границы эмиссионной плазмы в результате имеющейся неоднородности плотности эмиссионного тока. Наличие жалюзийного электрода, подключенного через сопротивление и включающего механизм отрицательной обратной связи, позволяет уменьшить величину тока эмиссии в момент резкого и неконтролируемого повышения тока в ускоряющем промежутке.

Предлагаемый подход использования перераспределяющего электрода жалюзийной конфигурации позволил увеличить размер электронного пучка с 20 до 40 мм за счет увеличения размера эмиссионного окна с сохранением принципа полного перехвата ионного потока данным электродом. При этом реализуется ненулевая переменная прозрачность для плазменных электронов, которые, попадая на границу эмиссионной плазмы, стабилизированную мелкоструктурной сеткой, извлекаются, создавая интенсивный пучок с удовлетворительным распределением плотности тока по сечению пучка. Сгенерированный электронный пучок использовался в экспериментах по модификации поверхно-

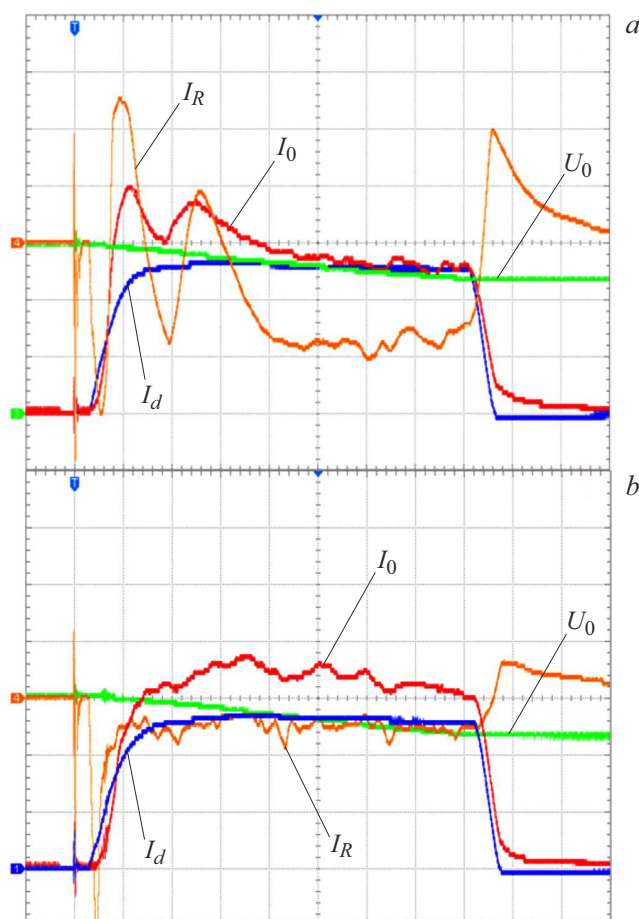


Рис. 3. Осциллограммы ускоряющего напряжения U_0 , тока в ускоряющем промежутке I_0 , тока в цепи перераспределяющего электрода I_R и тока в цепи дугового разряда I_d .

сти металлических материалов, в том числе и медноцинкового назначения, с целью создания слоев, отличающихся повышенными твердостью и износостойкостью.

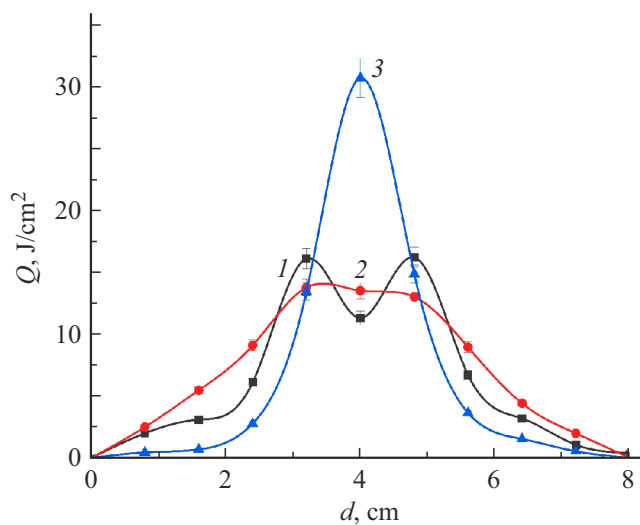


Рис. 4. Распределения плотности энергии электронного пучка по сечению, измеренные с помощью секционированного калориметра.

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] *Источники электронов с плазменным эмиттером*, под ред. Ю.Е. Крейнделя (Наука, Новосибирск, 1983).
- [2] В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовник, Е.М. Окс, Ю.Г. Юшков, *Форвакуумные плазменные источники электронов* (Изд-во Томск. гос. ун-та, Томск, 2014).
- [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. Крейндел, П.М. Щанин, *Электронные пучки большого сечения* (Энергоатомиздат, М., 1984).
- [5] М.С. Воробьев, 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. Gamermaster, V.N. Devyatkov, N.N. Koval', S.A. Sulakshin, P.M. Shchanin, *Tech. Phys. Lett.*, **40** (6), 506 (2014). DOI: 10.1134/S1063785014060261].
- [6] М.С. Воробьев, П.В. Москвин, В.И. Шин, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, Т.В. Коваль, С.Ю. Дорошкевич, М.С. Торба, К.Т. Ашурова, В.А. Леванисов, *Способ генерации электронного пучка для источников электронов с плазменными эмиттерами и анодной плазмой*, патент № 2780805 С1 (заявл. 27.12.2021, опубл. 04.10.2022).
- [7] Т.В. Коваль, В.И. Шин, М.С. Воробьев, П.В. Москвин, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, в сб. *Тр. VII Междунар. Крейнделевского семинара* (БНЦ СО РАН, Улан-Удэ, 2023), с. 71. DOI: 10.31554/978-5-7925-0655-8-2023-71-76

- [8] В.Н. Девятков, М.А. Мокеев, М.С. Воробьев, 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. Vorobyov, 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].
- [9] М.С. Воробьев, П.В. Москвин, В.И. Шин, Н.Н. Коваль, К.Т. Ашурова, С.Ю. Дорошкевич, В.Н. Девятков, М.С. Торба, В.А. Леванисов, *Письма в ЖТФ*, **47** (10), 38 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.10.50972.18719 [M.S. Vorobyov, P.V. Moskvina, V.I. Shin, N.N. Koval, K.T. Ashurova, S.Yu. Doroshkevich, V.N. Devyatkov, M.S. Torba, V.A. Levanisov, *Tech. Phys. Lett.*, **47**, 528 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021050291].
- [10] П.В. Москвин, М.С. Воробьев, А.А. Гришков, М.С. Торба, В.И. Шин, Н.Н. Коваль, С.Ю. Дорошкевич, Р.А. Картавцов, *Письма в ЖТФ*, **49** (11), 43 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.11.55538.19557 [P.V. Moskvina, M.S. Vorobyov, A.A. Grishkov, M.S. Torba, V.I. Shin, N.N. Koval, S.Yu. Doroshkevich, R.A. Kartavtsov, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (6), 38 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.06.56376.19557].
- [11] М.С. Воробьев, 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. Moskvina, 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].