

## Пространственная фокусировка радиально сходящегося электронного пучка в источнике на основе многодугового сеточного плазменного эмиттера

*М.С. Торба\*, А.А. Гришков, С.Ю. Дорошкевич, М.С. Воробьёв, Н.Н. Коваль*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

*\*torba@opee.hcei.tsc.ru*

**Аннотация.** При помощи численного моделирования проанализированы режимы генерации радиально сходящегося электронного пучка в источнике с многодуговым сеточным плазменным эмиттером. Моделирование проводилось при помощи PIC кода OOPIC Pro для режимов с амплитудой ускоряющего напряжения 20 и 50 кВ при амплитуде тока пучка до 100 А. Моделирование показало принципиально различный характер фокусировки электронного пучка на коллекторе для выбранных режимов генерации. Проведённые экспериментальные исследования показали хорошее совпадения результатов численного моделирования по распределениям электронного пучка на коллекторе с реальными отпечатками электронного пучка в эксперименте. Проведённые исследования были направлены на выбор и оптимизацию режимов генерации пучка для последующих экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** плазменный эмиттер, многодуговой источник плазмы, радиально сходящийся электронный пучок, компенсация объёмного заряда.

### 1. Введение

На настоящий момент метод импульсного плавления поверхностных слоёв металлических материалов низкоэнергетическими электронными пучками микросекундной длительности широко распространён для модификации поверхностных свойств материалов [1–9]. Не акцентируя внимание на особенностях и преимуществах отдельных источников, основанных на различных типах эмиссии и пригодных для решения этой задачи, отметим, что рассматриваемый нами способ генерации электронного пучка на основе многодугового сеточного плазменного эмиттера с радиально сходящимся пучком обладает рядом преимуществ по сравнению другими источниками с аналогичной конфигурацией электродной системы. Для источников на основе термоэлектронной эмиссии сложность реализации подобных систем заключается в необходимости обеспечения высоких плотностей эмиссионного тока в течении импульса. Для источников на основе взрывоэмиссионных катодов актуальными задачами, требующими особого внимания, являются, например, образование виртуального катода в ускоряющем промежутке [2, 3], перекрытие промежутка катодной и/или анодной плазмой и магнитная самоизоляция электронного пучка [8, 9]. Поскольку источник на основе плазменного эмиттера с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы может эффективно эксплуатироваться как в более высоких рабочих давлениях, так и в больших длительностях импульса при сопоставимой средней мощности с источниками на основе взрывной эмиссии [5, 6], то рассматриваемая система, на наш взгляд, может быть лишена описанных выше недостатков. Однако для данной системы существует проблема компенсации объёмного заряда электронного пучка нарабатываемой плазмой в ускоряющем промежутке, которая приводит к фокусировке (не всегда требуемой или даже избыточной) электронного пучка на мишени. В данной работе при помощи численного моделирования кодом OOPIC Pro исследуется процесс генерации электронного пучка и его пространственная фокусировка в коаксиальной системе с радиально сходящимся электронным пучком в различных рабочих режимах разработанного ранее источника [7].

### 2. Описание эксперимента и моделирования

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Многодуговой сеточный плазменный эмиттер 9 размещается в вакуумной камере 10, представляющий собой цилиндр,

корпус которого являлся анодом дугового разряда. Внутренняя стенка цилиндра выполнена из мелкоструктурной металлической сетки 3 с размером ячейки  $0.14 \times 0.14$  мм. В эксперименте и последующем моделировании длина эмиссионной области составляла 50 мм (остальная часть внутренней стенки цилиндра была закрыта фольгой). Внутри плазменного эмиттера располагался полый анод 4 (также из нержавеющей стали), который был подключен через сопротивление к основному аноду. Плазмогенераторы, создающие плазму дугового разряда, были закреплены на торцах цилиндра и разнесены на угол  $120$  градусов относительно друг друга (по 3 с каждой стороны). В качестве рабочего газа использовался аргон, эксперименты и моделирование проводились при давлении  $4 \cdot 10^{-2}$  Па. Дуговой разряд инициировался пробоем по поверхности диэлектрика между поджигающим электродом и катодом. В ускоряющем промежутке коллектором являлся стержень из нержавеющей стали диаметром 16 мм, расположенный на оси источника плазменного эмиттера. Характерные осциллограммы тока разряда  $I_d$  и тока в ускоряющем промежутке  $I_0$  представлены на рис. 2. Подробные детали эксперимента и конструкционные особенности представлены в работе [7].

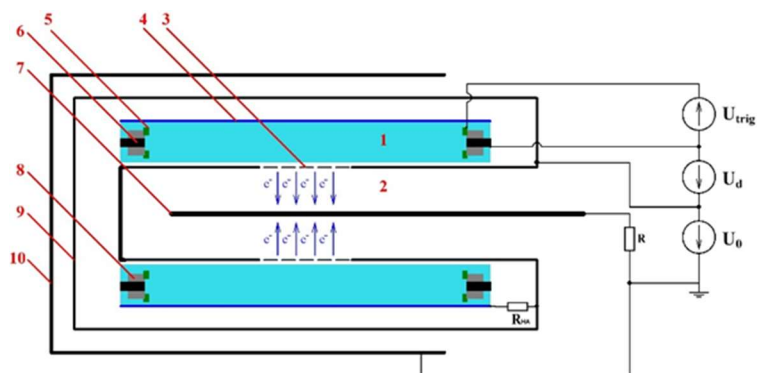


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – эмиссионная область, 2 – ускоряющий промежуток, 3 – эмиссионная сетка, 4 – полый анод, 5 – поджигающий электрод, 6 – катод, 7 – коллектор, 8 – анод разряда, 9 – плазменный эмиттер, 10 – вакуумная камера.

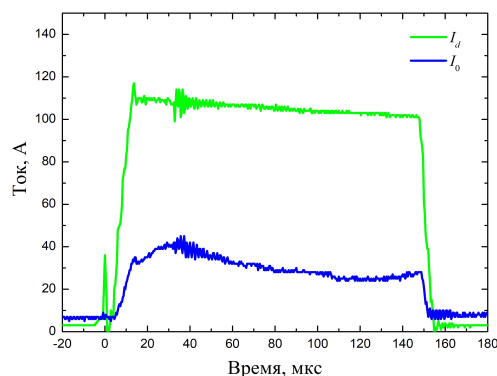


Рис. 2. Характерные осциллограммы: ток разряда  $I_d = 110$  А, ускоряющее напряжение 50 кВ, длительности импульса 150 мкс, давление  $4 \cdot 10^{-2}$  Па.

Для компьютерного моделирования использовался PIC код OOPIC Pro [10]. Расчёты проводились в осесимметричной RZ-геометрии. В расчётах плазмогенератор не моделировался, а в расчётную область инжектировался электронный пучок с однородным распределением плотности тока по длине эмиссионной области и с начальной энергией в десятки эВ. Отпечатки пучка на коллекторе рассчитывались для стационарных условий с токами инжекции электронного пучка, соответствующими среднему значению тока в основном промежутке. На рис. 3 приведены распределения электронов в ускоряющем промежутке для двух различных режимов облучения.

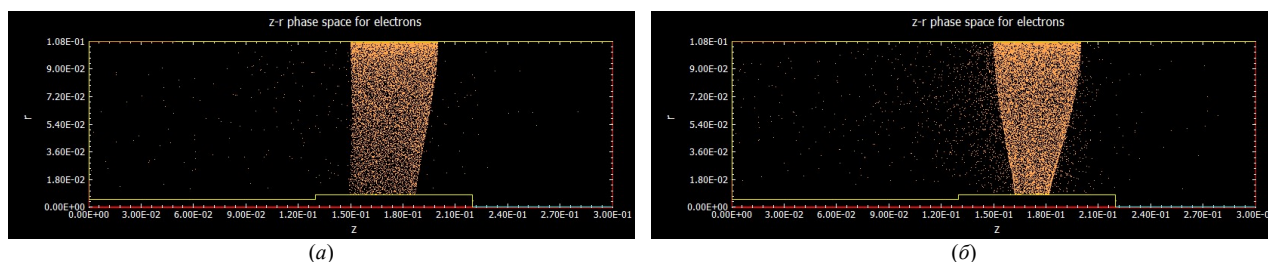


Рис. 3. Распределение электронов в ускоряющем промежутке для различных ускоряющих напряжений: (а) 50 кВ, (б) 20 кВ. Ток в ускоряющем промежутке 50 А, давление  $4 \cdot 10^{-2}$  Па.

Из рисунков видно, что для разных ускоряющих напряжений характер распределений существенно отличается: для ускоряющего напряжения 50 кВ электронный пучок на коллекторе практически не меняет своего начального пространственного распределения, тогда как для ускоряющего напряжения 20 кВ видна существенная фокусировка электронного пучка на коллекторе.

#### 4. Результаты и обсуждение

На рис. 4 представлены результаты компьютерного моделирования двух рабочих режимов для токов в ускоряющем промежутке до 100 А. Моделирование показало, что для ускоряющего напряжения амплитудой 50 кВ зависимость размера отпечатка от тока в основном промежутке имеет монотонный характер, а для ускоряющего напряжения 20 кВ зависимость имеет минимум. Полученный результат может быть обусловлен компенсацией объёмного заряда пучка нарабатываемой плазмой в ускоряющем промежутке, распределение и концентрация которой существенно зависит от ускоряющего напряжения. Для проверки результатов расчётов были получены отпечатки электронного пучка на коллекторе для режима облучения с ускоряющим напряжением 50 кВ и токами в диапазоне 30–40 А. Продольный размер полученных отпечатков для этого режима облучения обозначен на рис. 4 закрашенной областью. Из рисунка видно хорошее совпадение результатов моделирования с полученными в эксперименте отпечатками пучка на коллекторе. На рис. 5 приведена фотография одного из полученных отпечатков.

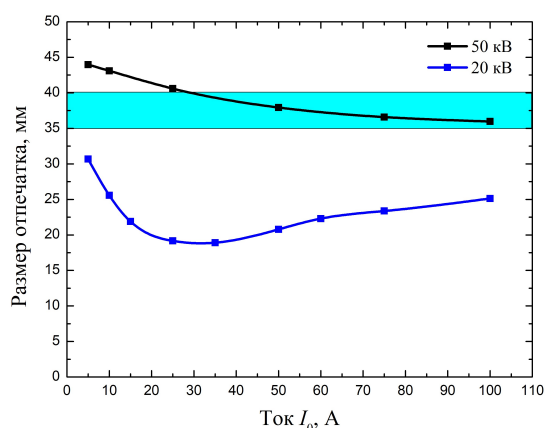


Рис. 4. Зависимость продольного размера отпечатка электронного пучка на коллекторе от величины тока в ускоряющем промежутке. Цветом выделена область с размерами отпечатков пучка в эксперименте для ускоряющего напряжения 50 кВ.



Рис. 5. Фотография коллектора из нержавеющей стали в режиме облучения: ускоряющее напряжение 50 кВ, длительность облучения 10 мин., частота импульсов 1 Гц, ток  $I_0 = 35$  А, длительности импульса 150 мкс, давление –  $4 \cdot 10^{-2}$  Па.

#### 5. Заключение

При помощи численного моделирования были проанализированы режимы генерации радиально сходящимся электронным пучком в источнике с многодуговым сеточным плазменным эмиттером в режимах с ускоряющим напряжением 20 и 50 кВ. Моделирование показало принципиально различный характер фокусировки электронного пучка на коллекторе для выбранных режимов, который может объясняться особенностями компенсации объёмного заряда электронов нарабатываемой плазмой в ускоряющем промежутке. Проведённые экспериментальные исследования показали хорошее совпадение результатов численного моделирования по распределениям электронного пучка на коллекторе с реальными отпечатками электронного пучка для одного из режимов генерации.

## Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проектов FWRM-2021-0006 и FWRM-2021-0007.

## 6. Список литературы

- [1] В.П. Ротштейн, Д.И. Проскуровский, Г.Е. Озур, Ю.Ф. Иванов, *Модификация поверхностных слоев металлических материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками*. Новосибирск: Наука, 2019.
- [2] В.И. Энгелько, Е.П. Павлов, К.И. Ткаченко, Н.П. Щеголихин, Установка ГЕЗА-4М для электронно-пучковой модификации поверхности оболочек ТВЭЛов РУ С ТЖМТ, *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*, 1, 67–74, 2019; doi: 10.55176/2414-1038-2019-1-67-74
- [3] R. Fetzer, W. An, A. Weisenburger, and G. Mueller, Different operation regimes of cylindrical triode-type electron accelerator studied by PIC code simulations, *Laser and Particle Beams*, **35**, 33–41, 2017; doi: 10.1017/S0263034616000768
- [4] Г.Е. Озур, Д.И. Проскуровский, Генерация низкоэнергетических сильноточных электронных пучков в пушках с плазменным анодом, *Физика плазмы*, **44**(1), 21, 2018; doi: 10.7868/S0367292118010146
- [5] Н.Н. Коваль, В.Н. Девятков, М.С. Воробьев, Сеточные плазменные катоды: история, состояние, перспективы, *Труды VII международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника»*. Улан-Удэ: Издательство Бурятского научного центра СО РАН, 34–41, 2023; doi: 10.31554/978-5-7925-0655-8-2023-34-41
- [6] Н.Н. Коваль, Ю.Х. Ахмадеев, В.В. Денисов, В.В. Шугуров, Е.В. Островерхов, Электронно-ионно-плазменное оборудование для реализации процессов модификации поверхности материалов и изделий, *Труды VII международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника» (Под ред. М.С. Воробьева)*. Улан-Удэ: Издательство Бурятского научного центра СО РАН, 42–49, 2023; doi: 10.31554/978-5-7925-0655-8-2023-42-49
- [7] М.С. Торба, С.Ю. Дорошкевич, М.С. Воробьев, Н.Н. Коваль, В.В. Ежов, С.А. Сулакшин, Р.А. Картавцов, Генерация радиально сходящегося электронного пучка в источнике с многодуговым сеточным плазменным катодом, *Труды VII международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника» (Под ред. М.С. Воробьева)*. Улан-Удэ: Издательство Бурятского научного центра СО РАН, 42–49, 2023; doi: 10.31554/978-5-7925-0655-8-2023-144-150
- [8] П.П. Кизириди, Г.Е. Озур, И.В. Пегель, Распределение плотности энергии радиально сходящегося низкоэнергетического сильноточного электронного пучка, *Proceedings of 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation. Tomsk: TPU Publishing House*, 59–64, 2024; doi: 10.56761/EFRE2024.S1-P-005201
- [9] П.П. Кизириди, Г.Е. Озур, И.В. Пегель, Влияние собственного магнитного поля на конфигурацию радиально сходящегося сильноточного электронного пучка, *Физика плазмы*, **66**(7), 25–33, 2023; doi: 10.17223/00213411/66/7/3
- [10] J.P. Verboncoeur, A.B. Langdon, N.T. Gladd, An object-oriented electromagnetic PIC code, *Computer Physics Communications*, **87**, 199, 1995; doi: 10.1016/0010-4655(94)00173-Y