

12.3;04.1

## Динамическое управление мощностью мегаваттного электронного пучка субмиллисекундной длительности в источнике с плазменным катодом

© М.С. Воробьёв, П.В. Москвин, В.И. Шин, Н.Н. Коваль, К.Т. Ашурова,  
С.Ю. Дорошкевич, В.Н. Девятков, М.С. Торба, В.А. Леванисов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: vorobyovms@yandex.ru

Поступило в Редакцию 28 января 2021 г.

В окончательной редакции 11 февраля 2021 г.

Принято к публикации 24 февраля 2021 г.

Описан способ контролируемого динамического изменения мощности электронного пучка в течение импульса субмиллисекундной длительности с использованием источника „СОЛО“ с плазменным катодом. Управление мощностью пучка осуществляется за счет динамического изменения амплитуды тока пучка при соответствующем малоинерционном изменении концентрации эмиссионной плазмы. Данный способ управления позволяет генерировать субмиллисекундные пучки переменной мощности (до 10 MW при максимальной скорости изменения не более  $0.5 \text{ MW}/\mu\text{s}$ ) и может использоваться при обработке различных металлических материалов с целью изменения функциональных свойств их поверхности с возможностью управления скоростью ввода энергии пучка в поверхность этих материалов.

**Ключевые слова:** дуговой разряд, плазменный катод, источник электронов, электронный пучок, управление мощностью пучка.

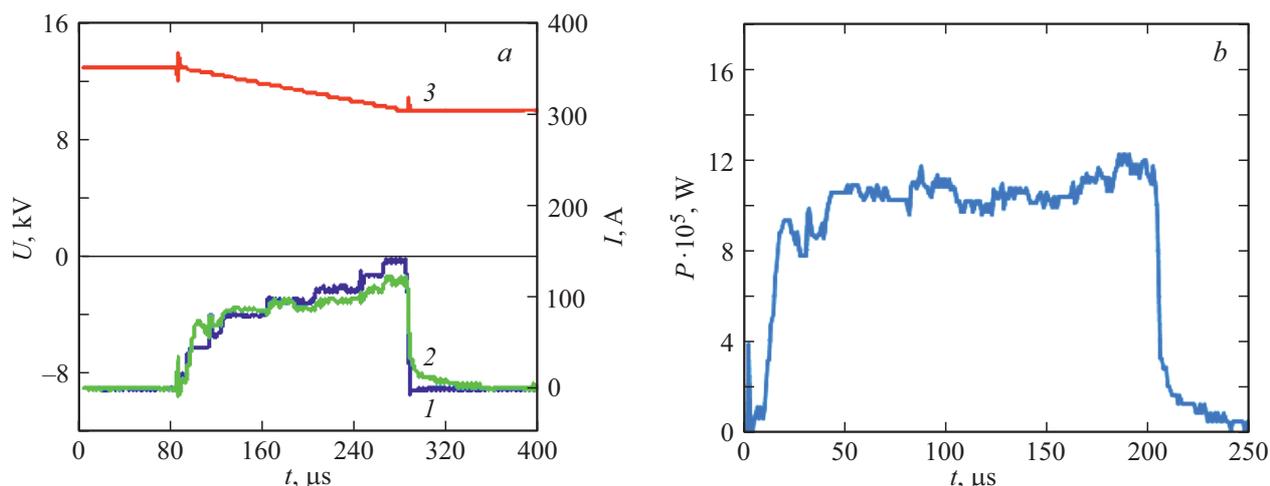
DOI: 10.21883/PJTF.2021.10.50972.18719

Источники импульсных сильноточных электронных пучков представляют значительный интерес прежде всего в связи с перспективностью их использования для обработки поверхности материалов [1–3]. Высокая энергетическая эффективность, сравнительно низкая неоднородность плотности энергии по сечению потока, хорошая воспроизводимость импульсов и высокая частота их следования выгодно отличают импульсные электронные пучки от лазерного излучения, мощных ионных пучков, а также от импульсных потоков низкотемпературной плазмы при потенциальном их использовании в технологических целях [4–6]. Чаще всего при использовании импульсных пучков исследователи оперируют понятиями „плотность энергии“ или „удельная энергия“, которая измеряется в  $\text{J}/\text{cm}^2$ . Однако в ряде материаловедческих задач требуется контролировать не только вложенную энергию, но и скорость ее ввода в поверхность образца, т. е. требуется контролировать плотность мощности пучка в течение его импульса, что может способствовать целенаправленному формированию структурно-фазового состояния облучаемой поверхности, особенно в случае создания поверхностных сплавов.

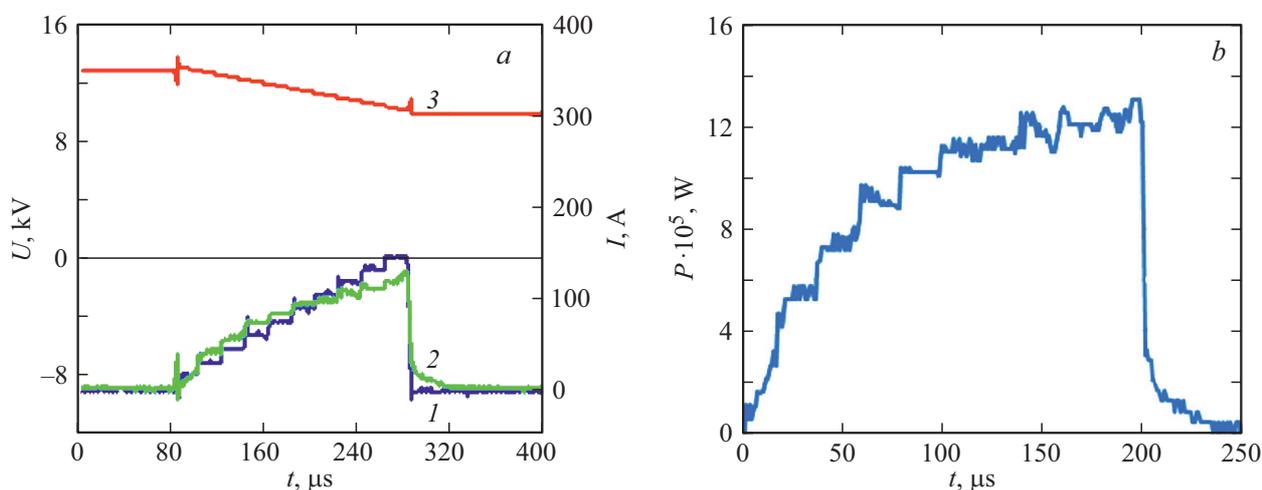
Отдельное место среди источников электронов занимают источники электронов с сетчатыми плазменными катодами [2,7–9], которые в настоящее время являются практически единственными эмиссионными структурами, способными обеспечить широкий интенсивный электронный пучок субмиллисекундной длительности, и обладают рядом неоспоримых преимуществ перед традиционными термо- и взрывоэмиссионными катода-

ми как по параметрам, так и по эксплуатационным свойствам. Сетчатая/слоевая стабилизация границы катодной/эмиссионной плазмы в таких источниках позволяет осуществлять независимую регулировку основных параметров электронного пучка (таких как энергия электронов, амплитуда тока пучка, длительность и частота следования импульсов), что облегчает научный поиск оптимальных режимов облучения в сравнительно широком диапазоне параметров пучка [10–13]. С учетом данной особенности источников с плазменным катодом в работе [14] были проведены теоретические оценки, подтверждающие возможность генерации электронного пучка миллисекундной длительности, мощность которого можно контролируемо изменять в течение импульса. Проведенные оценки позволили создать источник электропитания плазменного катода [15] и экспериментально продемонстрировать, что путем динамического изменения тока разряда, а следовательно, и концентрации эмиссионной плазмы [7] возможно осуществлять пропорциональное динамическое изменение тока пучка непосредственно во время импульса. Целью настоящей работы является демонстрация возможности динамического управления мощностью пучка мегаваттного уровня в течение импульса субмиллисекундной длительности.

Как и в [15], в настоящей работе использовался источник электронов „СОЛО“ с сетчатым плазменным катодом и плазменным анодом с открытой плазменной границей [16], входящий в перечень уникальных установок России в составе комплекса „УНИКУМ“. Данный источник позволяет генерировать электронный



**Рис. 1.** Осциллограммы (а) тока разряда (1), тока пучка (2) и ускоряющего напряжения (3) при квазипостоянной мощности пучка  $P$  (b) и плотности энергии  $25 \text{ J/cm}^2$ .

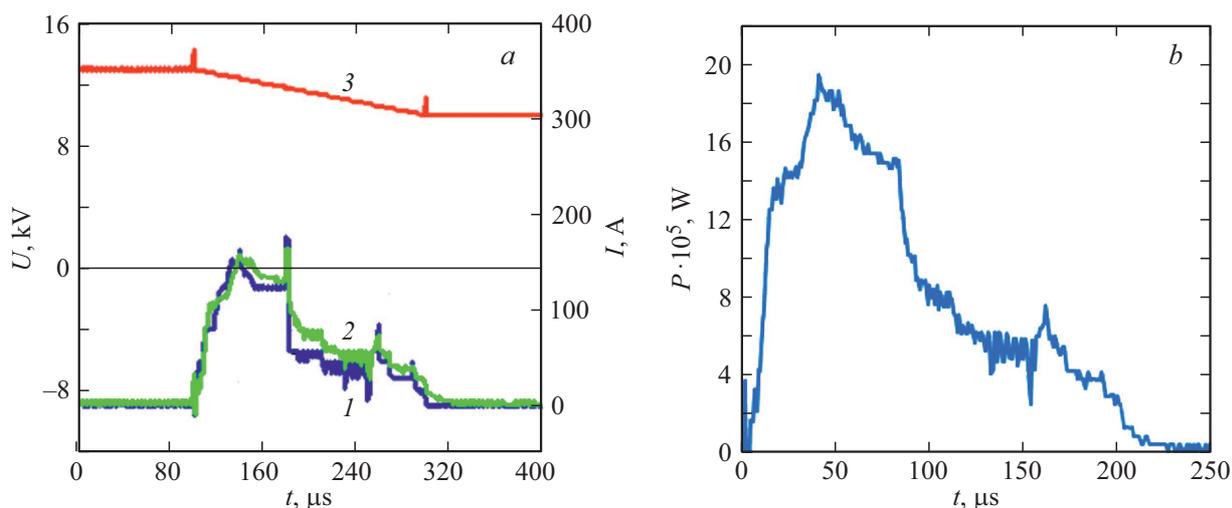


**Рис. 2.** Осциллограммы (а) тока разряда (1), тока пучка (2) и ускоряющего напряжения (3) при растущей мощности пучка  $P$  (b) и плотности энергии  $25 \text{ J/cm}^2$ .

пучок со следующими параметрами: энергия электронов до  $25 \text{ keV}$ , ток пучка  $10\text{--}300 \text{ A}$ , длительность импульсов тока пучка  $50\text{--}300 \mu\text{s}$ , диаметр пучка до  $40 \text{ mm}$ . Новая схема электропитания плазменного катода, более подробно описанная в [15], позволяет генерировать амплитудно-модулированный ток дугового разряда в течение импульса субмиллисекундной длительности, что дает возможность изменять концентрацию эмиссионной плазмы в этом же временном диапазоне. Важно отметить, что данная схема позволяет обеспечивать паузу между импульсами тока разряда, измеряющуюся десятками микросекунд, что также может быть необходимо при облучении поверхности различных неорганических материалов для контролируемого изменения их структурно-фазовых свойств. Поскольку для более стабильной работы плазменного эмиттера в интенсивных токовых режимах протяженность ионного слоя должна быть соизмерима с половиной ширины ячейки

эмиссионной сетки [7], использовалась сетка с ячейкой  $0.1 \times 0.1 \text{ mm}$ . При этом ширина ионного слоя, обратно пропорциональная квадратному корню от концентрации эмиссионной плазмы, для указанного диапазона тока изменяется от  $200$  до  $60 \mu\text{m}$ , что вполне удовлетворяет данному требованию.

На рис. 1–3 приведены характерные осциллограммы тока дугового разряда плазменного катода (1), тока в ускоряющем промежутке (2) и напряжения на ускоряющем промежутке (3). Прежде всего из осциллограмм видно, что можно достаточно просто обеспечить условия генерации, когда форма импульса тока пучка практически полностью повторяет форму импульса тока разряда, обеспечивая микросекундные фронты тока и высокую (близкую к 100%) эффективность извлечения электронов из эмиссионной плазмы. Поскольку появление тока в ускоряющем промежутке (осциллограмма 2) приводит к снижению напряжения (осциллограмма 3), это будет



**Рис. 3.** Осциллограммы (а) тока разряда (1), тока пучка (2) и ускоряющего напряжения (3) при спадающей мощности пучка  $P$  (b) и плотности энергии  $25 \text{ J/cm}^2$ .

приводить к снижению мощности пучка в течение импульса даже при постоянной амплитуде его тока. Однако при использовании возможности изменения тока разряда в течение импульса (осциллограмма 1) мощность пучка может быть не только постоянной (рис. 1, b), но и растущей (рис. 2, b) или падающей (рис. 3, b) со скоростью изменения, отличной от скорости изменения величины напряжения на высоковольтной конденсаторной батарее. Важно отметить, что средняя за импульс плотность энергии электронного пучка во всех трех случаях была специально подобрана одинаковой и составляла  $25 \text{ J/cm}^2$ , что было экспериментально измерено с помощью калориметра, подробно описанного в [17].

Используя такой сравнительно простой и эффективный способ генерации электронного пучка, можно динамически изменять его мощность с малой инерционностью управления (не более  $0.5 \text{ MW}/\mu\text{s}$ ). Максимальная мощность пучка для данной системы была ограничена величиной  $\sim 10 \text{ MW}$  имеющейся системой электропитания плазменного катода. Ступенчатое изменение тока дугового разряда, реализованное в используемом плазменном катоде, и соответственно тока в ускоряющем промежутке (см. осциллограммы 1 и 2 на рис. 1–3) также в большей степени определяется используемой системой электропитания плазменного катода. Фронт тока дугового разряда и соответственно фронт тока пучка могут быть больше, например, за счет введения индуктивного элемента в выходную цепь источника питания дугового разряда плазменного катода. При правильно рассчитанном дросселе это позволяет обеспечить более плавное изменение мощности пучка (не ступенчатое).

Впервые продемонстрированное в данных экспериментах динамическое малоинерционное изменение мощности электронного пучка в течение импульса субмиллисекундной длительности открывает дополнительные возможности его использования как в научных, так и

в технологических целях. При этом мощность пучка может быть не только монотонно или ступенчато падающей, но и постоянной или даже монотонно или ступенчато растущей. Однако требуется отметить необходимость дальнейших исследований, ориентированных на уменьшение влияния факторов, дестабилизирующих работу источника электронов (инерционность процессов генерации анодной/пучковой плазмы, испарения и абляции материала коллектора и других включений на его поверхности и т. д.)

### Финансирование работы

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

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, S.V. Vorobiev, S.V. Kononov, *Fatigue of steels modified by high intensity electron beams* (Cambridge, 2015).
- [2] 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).  
[Пер. версия: 10.1134/S1063785014060261].
- [3] *Сильноточные импульсные электронные пучки для авиационного двигателестроения*, под общ. ред. А.С. Новикова, В.А. Шулова, В.И. Энгелько (Дипак, М., 2012).
- [4] Ю.Н. Тюрин, М.Л. Жадкевич, *Плазменные упрочняющие технологии* (Наук. думка, Киев, 2008).

- [5] V.V. Uglov, N.N. Cherenda, V.M. Anishchik, A.K. Stalmashonak, A.G. Kononov, Yu.A. Petuhov, V.M. Astashynski, A.M. Kuzmitski, *J. High Temp. Mater. Process.*, **11** (3), 383 (2007). DOI: 10.1615/HighTempMatProc.v11.i3.60
- [6] Э.В. Козлов, А.М. Глезер, Н.А. Конева, Н.А. Попова, И.А. Курзина, *Основы пластической деформации наноструктурных материалов* (Физматлит, М., 2016).
- [7] Н.Н. Коваль, Е.М. Окс, Ю.С. Протасов, Н.Н. Семашко, *Эмиссионная электроника* (Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2009); Е.М. Oks, *Plasma cathode electron sources — physics, technology, applications* (Wiley-VCH, N.Y., 2006).
- [8] В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, П.М. Щанин, *ЖТФ*, **68** (1), 44 (1998). [Пер. версия: 10.1134/1.1258932].
- [9] 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).
- [10] Н.Н. Коваль, В.Н. Девятков, М.С. Воробьёв, *Изв. вузов. Физика*, **63** (10), 7 (2020). DOI: 10.17223/00213411/63/10/7
- [11] V.T. Astrelin, I.V. Kandaurov, M.S. Vorobyov, N.N. Koval, V.V. Kurkuchekov, S.A. Sulakshin, Yu.A. Trunev, *Vacuum*, **143**, 495 (2017). DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.03.025
- [12] Н.В. Гаврилов, В.В. Осипов, О.А. Буреев, Д.Р. Емлин, А.С. Каменецких, В.А. Шитов, *Письма в ЖТФ*, **31** (3), 72 (2005). [Пер. версия: 10.1134/1.1877622].
- [13] А.В. Казаков, В.А. Бурдовицин, А.В. Медовник, Е.М. Окс, *Приборы и техника эксперимента*, № 6, 50 (2013). DOI: 10.7868/S0032816213060049
- [14] M.S. Vorobyov, S.S. Kovalsky, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1393**, 012035 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1393/1/012035
- [15] M.S. Vorobyov, N.N. Koval, P.V. Moskvina, A.D. Teresov, S.Yu. Doroshkevich, V.V. Yakovlev, V.I. Shin, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1393**, 012064 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1393/1/012064
- [16] С.В. Григорьев, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, А.Д. Тересов, *Письма в ЖТФ*, **36** (4), 23 (2010). [Пер. версия: 10.1134/S1063785010020203].
- [17] А.Д. Тересов, Т.В. Коваль, Ч.М.К. Ан, П.В. Москвин, *Изв. РАН. Сер. физ.*, **83** (11), 1534 (2019). DOI: 10.1134/S0367676519110267 [Пер. версия: 10.3103/S106287381911025X].