

УДК 537.525

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-48-54

EDN: TIXDBK

PACS: 52.80.-s



Структура электронного пучка, формируемого в сильноточном диоде со встроенными в катод дуговыми источниками плазмы

П. П. Кизириди, Г. Е. Озур, А. В. Шнайдер

С помощью тепловизионной диагностики и широкополосной осциллографии исследованы распределения плотности тока и энергии по сечению низкоэнергетического (до 30 кэВ) сильноточного (до 20 кА) электронного пучка микросекундного диапазона длительностей импульса. Показано, что распределение плотности энергии является достаточно однородным (внутри круга диаметром около 2,5 см, т. е. близким к внешнему диаметру эмитирующей части катода) при индукции ведущего магнитного поля сравнимой или несколько большей индукции собственного магнитного поля пучка. В слабом ведущем магнитном поле (или при его отсутствии) пучок фокусируется, распределение плотности энергии становится резко неоднородным. Показано также, что даже относительно слабое магнитное поле (около 25 мТл) стабилизирует поперечное положение пучка от импульса к импульсу. Каких-либо микронеоднородностей миллиметрового масштаба в распределениях плотности энергии не наблюдалось.

Ключевые слова: сильноточный электронный пучок, дуговые источники плазмы, взрывная эмиссия, ведущее магнитное поле, тепловизионная диагностика, фокусировка пучка.

Введение

Источники низкоэнергетических (до 30 кэВ) сильноточных (десятки кА) электронных пучков (НСЭП) микросекундной длительности (2–4 мкс) широко используются для модификации поверхностных слоев металлов и сплавов методом импульсного плавления [1–4]. Изучение структуры и свойств модифицируемых слоев производится обычно после облучения и извлечения образца из вакуумной

камеры. В настоящее время в Сибирском отделении РАН выполняется проект, предусматривающий в том числе, изучение процесса модификации поверхностных слоев *в режиме реального времени, т. е. в течение самого процесса облучения и/или формирования покрытий*. Для этого создаются многофункциональные установки рабочих станций строящегося Сибирского кольцевого источника фотонов (СКИФ), генерирующего синхротронное излучение высокой интенсивности в рентгеновском диапазоне. Использование этого излучения позволит исследовать, например, динамику изменения фазового состава в поверхностном слое образца.

В работе [5] нами представлен компактный источник НСЭП, который предполагается использовать в составе вышеупомянутых установок рабочих станций комплекса СКИФ. Работа электронной пушки источника основана на инициировании взрывной электронной эмиссии с помощью встроенных в дисковый катод резистивно развязанных дуговых источников плазмы [6, 7]. Такой взрывоэмиссион-

Кизириди Павел Петрович, м.н.с., к.т.н.

E-mail: kiziridi_pavel@mail.ru

Озур Григорий Евгеньевич, в.н.с., д.т.н.

E-mail: ozur@lve.hcei.tsc.ru

Шнайдер Антон Витальевич, в.н.с., к.т.н.

E-mail: schneider@lve.hcei.tsc.ru

Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634055, Томская обл., г. Томск,

пр-кт Академический, 2/3.

Статья поступила в редакцию 20.03.2023

После доработки 24.04.2023

Принята к публикации 28.04.2023

© Кизириди П. П., Озур Г. Е., Шнайдер А. В., 2023

ный катод может эффективно работать не только в плазмонаполненном диоде, но и в вакуумном или газонаполненном диоде, что позволяет существенно сократить продольные размеры пушки, а также упростить систему её питания. Отличительной чертой пушки является также использование одиночного постоянного кольцевого магнита, создающего ведущее магнитное поле (около 20 мТл на расстоянии 2 см от катода) для транспортировки пучка от катода к аноду (мишени). Настоящая работа посвящена изучению характеристик и структуры электронного потока, формируемого в данной электронной пушке.

Методика экспериментов

Катодный узел пушки включает в себя взрывоэмиссионный катод 1 в виде перфорированного медного диска диаметром 30 мм, в

отверстия которого заподлицо вставлены керамические трубки 2 и медные электроды 3 (рис. 1), образующие вместе с катодом дуговые источники плазмы [5]. 10 дуговых источников расположены по окружности $\varnothing 15$ мм и 15 источников – по окружности $\varnothing 24$ мм. Каждый из 25-ти электродов заземлен через резисторы 5 сопротивлением около 2,25 кОм (три последовательно соединенных резистора номиналом 750 Ом каждый). Резистивная развязка дуговых источников обеспечивает их длительную устойчивую работу. Для увеличения количества взрывоэмиссионных центров в катод (по всей поверхности) также впрессованы пучки тонких (80 мкм) медных проволок 4 в количестве 25 штук (справа на рис. 1 условно показаны 6 штук). Таким образом, эмитирующая часть катода фактически представляет собой кольцо внешним диаметром примерно 24 мм и шириной – 4,5 мм.

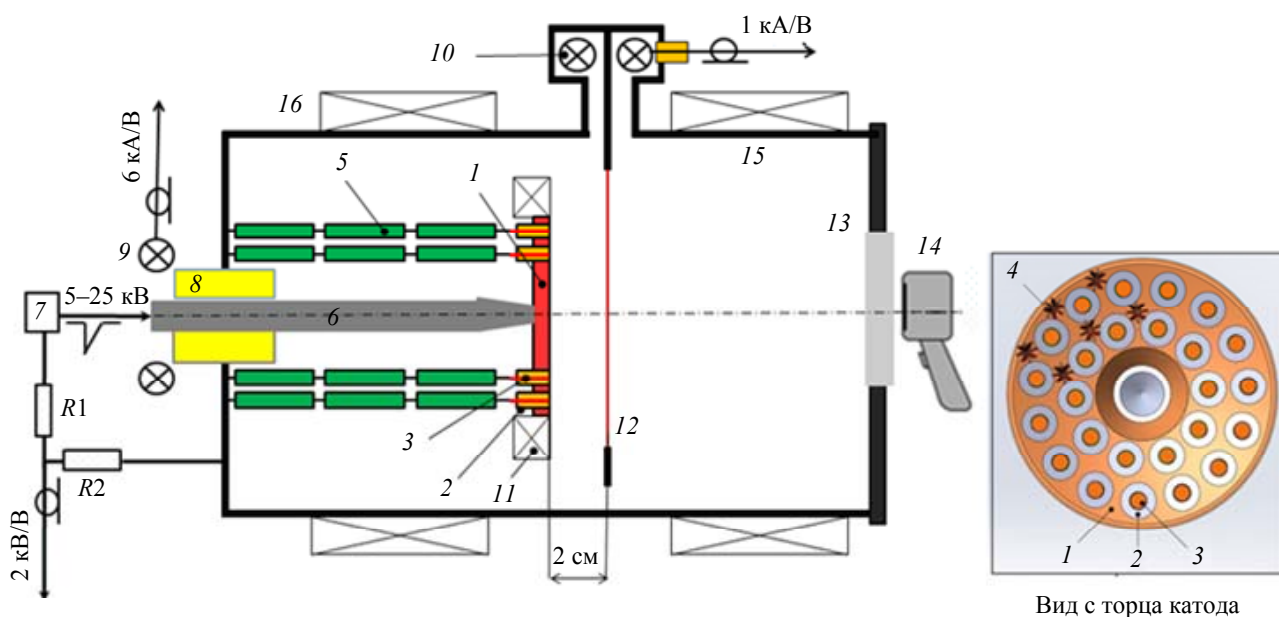


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – катод; 2 – керамические трубки; 3 – медные электроды; 4 – пучок медных проволок; 5 – резистор ТВО-2 (750 Ом); 6 – катододержатель; 7 – генератор высоковольтных импульсов; 8 – изолятор ввода ускоряющего напряжения; 9 и 10 – пояса Роговского; 11 – постоянный магнит, 12 – тепловизионная мишень; 13 – окно из флюорита кальция; 14 – тепловизор TESTO 875-1; 15 – вакуумная камера; 16 – соленоид. R1, R2 – активный делитель напряжения

Кольцевой постоянный магнит 11 из Nd-Fe-B, создающий ведущее магнитное поле, расположен в коробе из нержавеющей стали, который электрически соединён с катодом. При необходимости, кроме постоянного магнитного поля создавалось дополнительное ведущее магнитное поле индукцией до

$B_z = 110$ мТл с помощью соленоида 16. Направление вектора индукции обоих полей определялось с помощью компаса. Конфигурация магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом, рассчитана в среде Comsol Multiphysics и представлена на рис. 2. Результаты расчётов проверялись с помощью изме-

рителя магнитной индукции РШ1-10, и в таблице приведены значения B_z в области формирования пучка, располагающейся вблизи коллектора (анода).

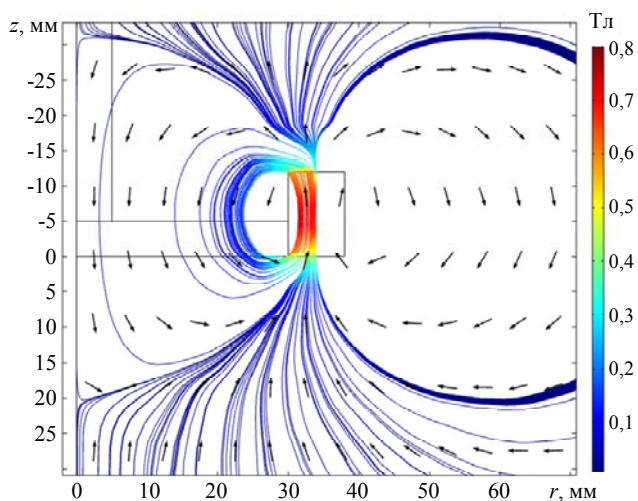


Рис. 2. Конфигурация магнитного поля постоянного магнита

Таблица

Измеренные значения продольной компоненты индукции ведущего магнитного поля

r , мм	0	10	0	10
z , мм	15	15	20	20
B_z , мТл	29,4	35,7	17,7	20,4

Откачка рабочего объема (рабочей камеры) производилась турбомолекулярным насосом Turbovac 350i (давление остаточного газа 0,004 Па); напуск рабочего газа (аргон) осуществлялся с помощью прибора СНА-2 до давлений 0,08–1,3 Па.

Пушка работает следующим образом. При подаче на катод импульса напряжения отрицательной полярности амплитудой от 5 до 25 кВ происходит пробой по поверхности торцов керамических трубок, и возникает плазма, состоящая из материалов катода (катодные пятна), керамических трубок и электродов 3, а также ионизованного десорбированного газа. Образование катодных пятен (взрывоэмиссионных центров) при протекании тока между катодом и электродами 3 (эти пятна можно назвать затравочными) обеспечивается тем, что амплитуда тока через каждый промежуток превышает пороговый ток дуги [8], который составляет от долей до единиц ампер практически для всех катодных материалов. Электроны, эмитируемые затравоч-

ными, а также возникшими в течение импульса катодными пятнами, ускоряются к заземленному коллектору (в данном случае – тепловизионной мишени 12) и поглощаются в нём.

Регистрация импульсов ускоряющего напряжения осуществлялась с помощью активного делителя $R1$, $R2$; тока катода и тока пучка на коллектор – поясами Роговского 9 и 10. Сигналы с датчиков подавались на входы 4-канального широкополосного (200 МГц) цифрового осциллографа Tektronix TDS 2024. Измерение энергии пучка в импульсе и её распределение по сечению осуществлялось с помощью тепловизора 14 по методике, описанной в [9]. Пространственное разрешение тепловизионной диагностики, определяемое расплыванием теплового отпечатка в паузе (около 0,8 с) между импульсом пучка и моментом фиксации термограммы, составляло около 2 мм.

Держатель тепловизионной мишени 12 соединён с радиальным стержневым токопроводом, что позволяет одновременно (в одном импульсе) регистрировать осциллограмму тока пучка и его термограмму [9].

Регистрация осциллограмм плотности тока осуществлялась с помощью 4-канального секционированного цилиндра Фарадея (СЦФ) с диаметром коллимирующих отверстий в его плоской диафрагме 1,5 мм, схематично представленным на рис. 3. Отверстия располагались на радиусах $r = 0; 15; 30$ и 45 мм от оси пучка. В этих экспериментах СЦФ устанавливался вместо тепловизионной мишени, а его диафрагма фактически являлась анодом пушки.

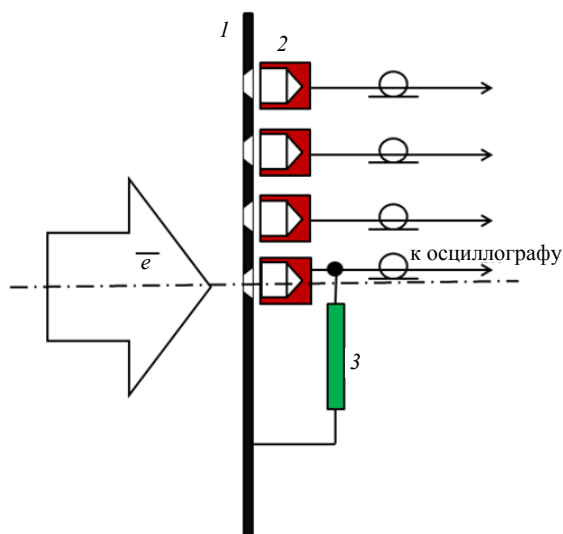


Рис. 3. Секционированный цилиндр Фарадея: 1 – диафрагма (нержавеющая сталь); 2 – поглотитель (медь); 3 – нагрузочный резистор ТВО-0,25 (5 Ω)

Результаты экспериментов и обсуждение

На рис. 4 приведены характерные осциллограммы импульсов (аппаратно-усреднённые по 16 выстрелам), термограммы и соответствующие им распределения плотности энергии по сечению пучка, полученные при различных значениях индукции ведущего магнитного поля, B_z . При $B_z = 0$ (постоянный магнит удалён, соленоид не включен) пучок сфокусирован, плотность энергии достигает 4 Дж/см². При $B_z \approx 25$ мТл (постоянный магнит установлен, соленоид не включен) пучок также сфокусирован,

плотность энергии в пике увеличивается до 5 Дж/см². Отметим, однако, что в относительно слабом (по сравнению с собственным магнитным полем пучка) поле постоянного магнита, диаметр центральной части пучка на уровне 90 % от максимума составляет около 1 см, что достаточно для проведения экспериментов по воздействию на металлические образцы. И наконец, при $B_z \approx 140$ мТл (постоянный магнит установлен, соленоид включен) распределение плотности энергии по сечению пучка становится более равномерным, хотя и снижается примерно до 3 Дж/см² в максимуме.

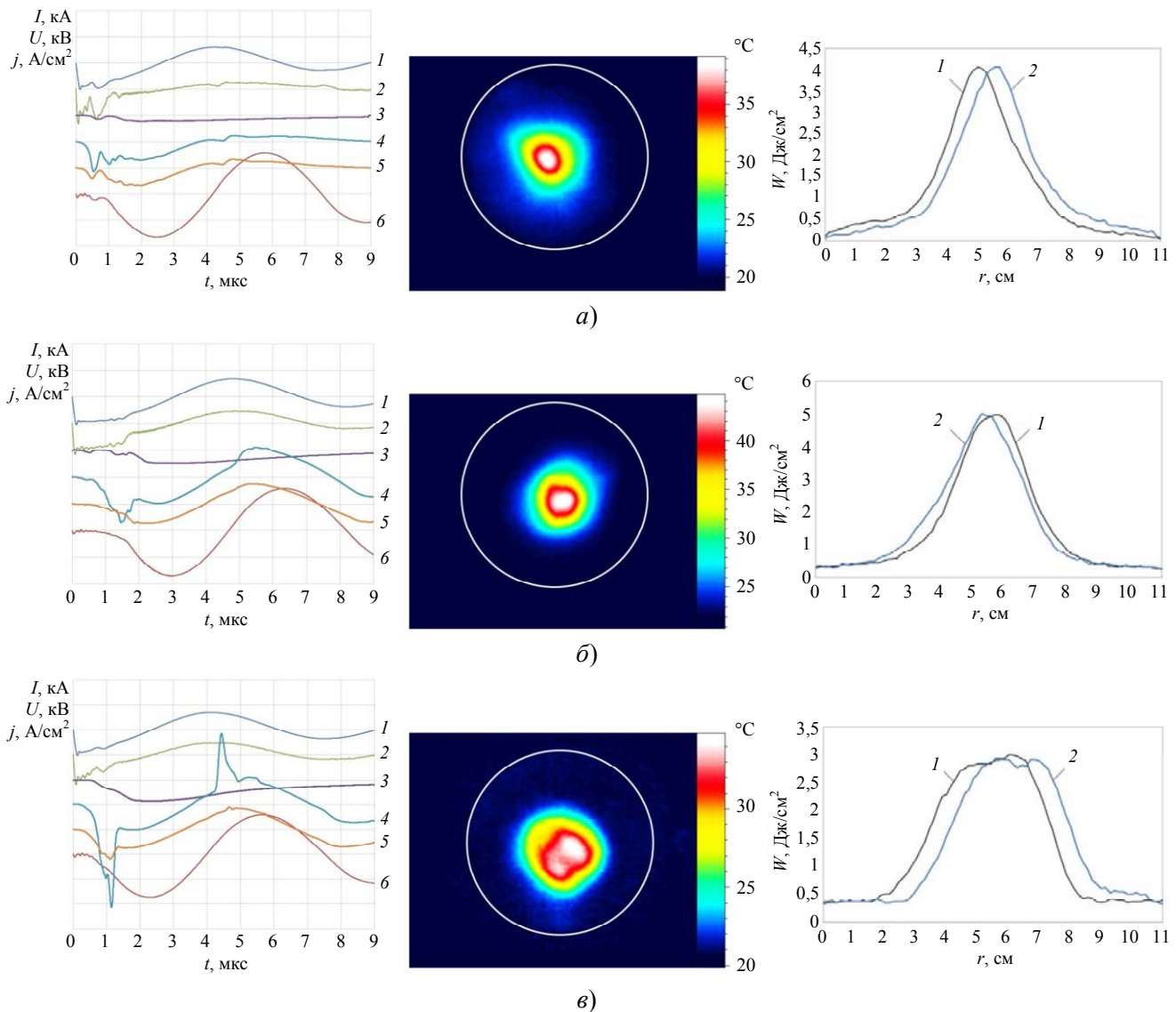


Рис. 4. Осциллограммы (слева), термограммы (в центре) и распределения плотности энергии по сечению пучка (справа): 1 – распределение по горизонтали, 2 – по вертикали, полученные при различных значениях внешнего ведущего магнитного поля: а – $B_z = 0$, б – поле постоянного магнита, $B_z \approx 25$ мТл, в – суммарное поле постоянного магнита и соленоида, $B_z \approx 140$ мТл.

Осциллограммы: ускоряющее напряжение (исходная, 20 кВ/дел) – кривая 1; ускоряющее напряжение (скорректированная с учётом индуктивного падения напряжения, 20 кВ/дел) – кривая 2; ток пучка на коллектор (20 кА/дел) – кривая 3; плотность тока при $r = 0$ (275 (А/см²)/дел) – кривая 4; плотность тока при $r = 15$ мм (275 (А/см²)/дел) – кривая 5; полный ток в контуре (20 кА/дел) – кривая 6

Анализ большого числа термограмм показал, что даже сравнительно небольшое поле постоянного магнита существенно стабилизирует поперечное положение максимума плотности энергии пучка от импульса к импульсу. Несмотря на относительно небольшую длину транспортировки пучка (расстояние между катодом и анодом – 2 см), микронеоднородности миллиметрового масштаба, обусловленные дискретным характером эмиссии с катода, на термограммах не наблюдались независимо от индукции ведущего магнитного поля. Этот факт можно объяснить слиянием плазмы эмиссионных центров и образованием сплошной эмитирующей поверхности до момента отбора большого тока, а также сравнительно небольшими значениями индукции ведущего магнитного поля.

Результаты тепловизионных измерений подтвердились измерениями плотности тока пучка. На осциллограммах плотности тока, представленных на рис. 4 (левый столбец), можно выделить две основные стадии: первый всплеск плотности тока длительностью на полувысоте около 0,5 мкс, особенно ярко выраженный при $r = 0$ (несмотря на отсутствие эмиттеров в центральной части катода!), и последующая стадия, когда ускоряющее напряжение значительно падает (до единиц киловольт). На первой стадии, амплитуда плотности тока на оси пучка существенно превосходит её значение на периферии. Даже при $B_z = 140$ мТл плотность тока на оси примерно втрое превосходит плотность тока при $r = 15$ мм, не говоря уже про $r = 30$ мм. Пик плотности тока при $r = 0$ достигается через 0,7–1 мкс после начала импульса. Спад плотности тока в этом всплеске совпадает по времени с резким спадом ускоряющего напряжения, что затрудняет прохождение коллимированного пучка к поглотителю его собственным объёмным зарядом при низких продольных скоростях электронов.

Наблюдаемые всплески плотности тока при $r = 0$ объясняются, на наш взгляд, совокупным действием трёх факторов. Первый – фокусирующее действие собственного магнитного поля пучка, ток которого на первой стадии уже составляет несколько килоампер (т. е. сравним с током Альфвена). Второй – «эффект мазков» [10, 11], который фактически представляет собой сложение траекторий

электронов, эмитируемых с фронтальной и боковой поверхности плазменных сгустков (катодных факелов по терминологии [12]). И наконец, третий фактор заключается в увеличенной концентрации плазмы за счет разлёта плазмы катодных факелов в радиальном направлении и соответствующего сложения их концентраций. Отметим, что ведущее магнитное поле не в состоянии воспрепятствовать радиальному движению плазмы, поскольку дуговые источники плазмы, встроенные в наш катод, фактически представляют собой торцевые пушки Бостика, токнесущая плазма которых дрейфует поперек силовых линий магнитного поля с довольно большой скоростью: до 2 см/мкс [13]. Наличие такого дрейфа наблюдалось также в наших первых работах по созданию источников НСЭП в пушках с плазменным анодом, который и создавался с помощью дуговых источников, расположенных по окружности отверстия в анодном электроде [14].

На второй стадии различие значений плотности тока между центральной и периферийной частью пучка уменьшается и, прежде всего, при $B_z = 140$ мТл. Предполагаем, что это обусловлено ослаблением «эффекта мазков», а также некоторым выравниванием концентрации плазмы по сечению пучка.

Заключение

Распределение плотности энергии (тока) по сечению низкоэнергетического сильноточного электронного пучка, формируемого в пушке с кольцевой эмитирующей поверхностью, внешний радиус которой сравним с шириной ускоряющего зазора, имеет максимум в приосевой области. Наиболее ярко этот максимум выражен в отсутствие внешнего ведущего магнитного поля и в слабом поле (около 25 мТл), создаваемом кольцевым постоянным магнитом. Тем не менее, даже в этом слабом поле диаметр центральной части пучка на уровне 90 % от максимума составляет около 1 см, что достаточно для проведения экспериментов по модификации металлических материалов. В случае же когда индукция внешнего магнитного поля становится сравнимой с индукцией собственного магнитного поля пучка, распределение плотности энергии выглядит

достаточно однородным внутри круга диаметром около 2,5 см, что близко к внешнему диаметру эмитирующей части катода.

Важным результатом является также стабилизация поперечного положения пучка от импульса к импульсу в слабом магнитном поле, создаваемом кольцевым постоянным магнитом, по сравнению со случаем отсутствия этого поля.

Отсутствие микронеоднородностей миллиметрового масштаба, обусловленных дискретным характером эмиссии с катода, можно объяснить слиянием плазмы эмиссионных центров и образованием сплошной эмитирующей поверхности до момента отбора большего тока, а также сравнительно небольшими значениями индукции ведущего магнитного поля.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (в рамках проекта «In situ методы синхротронных исследований многослойных функциональных структур с уникальными параметрами и свойствами, созданных пучково-плазменной инженерией поверхности» – № 075-15-2021-1348 от 05.10.2021 г., выполнена работа по разработке, изготовлению и испытанию источника НСЭП, включая расчёт магнитного поля в среде Comsol Multiphysics (мероприятие № 3.2.13 согласно плану-графику); в рамках проекта № FWRM-2021-0007 «Низкотемпературная плазма стационарных и импульсных разрядов в газах и вакууме и её применение в электрофизических устройствах» – программа фундаментальных научных исследований Сибирского отделения РАН «Низкотемпературная газоразрядная плазма и её применение для решения научных и технологических задач» выполнены работы по измерению плотности энергии пучка и её распределения по

сечению, а также анализ проблемы микронеоднородностей пучка).

ЛИТЕРАТУРА

1. Meisner S. N., Yakovlev E. V., Semin V. O., Meisner L. L., Rotshtein V. P., Neiman A. A., D'yachenko F. A. / *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 437. P. 217. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.107>
2. Uno Y., Okada A., Uemura K., Raharjo P., Furukawa T., Karato K. / *Precision Engineering*. 2005. Vol. 29. P. 449. doi: 10.1016/j.precisioneng.2004.12.005
3. Murray J. W., Clare A. T. / *Journal of Materials Processing Technology*. 2012. Vol. 212. P. 2642. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.07.018>
4. Meisner L. L., Rotshtein V. P., Semin V. O., Meisner S. N., Markov A. B., Yakovlev E. V., D'yachenko F. A., Neiman A. A., Gudimova E. Yu. / *Surface & Coatings Technology*. 2020. Vol. 404. P. 12644. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126455>
5. Кузириди П. П., Озур Г. Е., Марков А. Б. / *Прикладная физика*. 2022. № 4. С. 34.
6. Кузириди П. П., Озур Г. Е. / *Письма в ЖТФ*. 2020. Т. 46. № 15. С. 47. doi: 10.21883/PJTF.2020.15.49750.18364
7. Kiziridi P. P., Ozur G. E. / *Vacuum*. 2021. Vol. 194. P. 110560. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110560>
8. Кецаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. – М.: Наука, 1968.
9. Кузириди П. П., Озур Г. Е. / *ЖТФ*. 2022. Т. 92. № 6. С. 876. DOI:10.21883/JTF.2022.06.52518.316-21
10. Баженов Г. П., Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. / *Изв. вузов. Физика*. 1970. № 8. С. 87.
11. Беломытцев С. Я., Ильин В. П., Литвинов Е. А., Месяц Г. А. Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков. – Новосибирск: Наука, 1976. С. 93.
12. Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Импульсный электрический разряд в вакууме. – Новосибирск: Наука, 1984.
13. Bostik W. H. / *Phys. Rev. D*. 1956. Vol. 104. № 2. P. 292.
14. Озур Г. Е., Проскуровский Д. И. Источники низкоэнергетических сильноточных электронных пучков с плазменным анодом. – Новосибирск: Наука, 2018.

Structure of an electron beam formed in a high-current diode with arc plasma sources built-in to a cathode

P. P. Kiziridi, G. E. Ozur and A. V. Shnaider

Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
2/3 Akademicheskoy Ave., Tomsk, 634055, Russia
E-mail: kiziridi_pavel@mail.ru

Received 20.03.2023; revised 24.04.2023; accepted 28.04.2023

The distributions of the current and energy densities of low-energy (up to 30 keV), high-current (up to 20 kA) electron beam of microsecond duration have been studied with the use of thermal imaging and wide-band oscilloscope. It was shown that energy density distribution is quite uniform (inside the circle of 2.5 cm in diameter that is closer to the outer diameter of cathode emitting part) at the guide magnetic field compared or somewhat higher in induction to the beam self-magnetic field. In the case of low guide magnetic field or its absence, the beam focuses and its energy density distribution becomes sharp non-uniform. It was also shown that even low magnetic field (about 25 mT) stabilizes the beam position in cross section. Any micro-non-uniformities of millimeter scale were not observed in the energy density distributions.

Keywords: high-current electron beam, arc plasma sources, explosive emission, guide magnetic field, thermal imaging, beam focusing.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-48-54

REFERENCES

1. Meisner S. N., Yakovlev E. V., Semin V. O., Meisner L. L., Rotshtein V. P., Neiman A. A. and D'yachenko F. A., *Applied Surface Science* **437**, 217 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.107>
2. Uno Y., Okada A., Uemura K., Raharjo P., Furukawa T. and Karato K., *Precision Engineering* **29**, 449 (2005). doi:10.1016/j.precisioneng.2004.12.005
3. Murray J. W. and Clare A. T., *Journal of Materials Processing Technology* **212**, 2642 (2012). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.07.018>
4. Meisner L. L., Rotshtein V. P., Semin V. O., Meisner S. N., Markov A. B., Yakovlev E. V., D'yachenko F. A., Neiman A. A. and Gudimova E. Yu., *Surface & Coatings Technology* **404**, 12644 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126455>
5. Kiziridi P. P., Ozur G. E. and Markov A. B., *Applied Physics*, № 4, 34 (2022) [in Russian].
6. Kiziridi P. P. and Ozur G. E., *Technical Physics Letters* **46** (15), 47 (2020).
7. Kiziridi P. P. and Ozur G. E., *Vacuum*, **194**, 110560 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110560>
8. Kesaev I. G., *Cathode processes of vacuum arc*, Moscow, Nauka, 1968 [in Russian].
9. Kiziridi P. P. and Ozur G. E., *Technical Physics* **92** (6), 876 (2022).
10. Bazhenov G. P., Mesyats G. A. and Proskurovsky D. I., *Russian Physics Journal*, № 8, 87 (1970) [in Russian].
11. Belomytsev S. Ya., Il'in V. P., Litvinov E. A. and Mesyats G. A., *Development and application of the sources of intensive electron beams*, Novosibirsk, Nauka, 1976, p. 93 [in Russian].
12. Mesyats G. A. and Proskurovsky D. I., *Pulsed Electrical Discharge in Vacuum*, Berlin, Springer-Verlag, 1989.
13. Bostik W. H., *Phys. Rev. D* **104** (2), 292 (1956).
14. Ozur G. E. and Proskurovsky D. I., *The Sources of Low-Energy, High-Current Electron Beams with Plasma Anode*, Novosibirsk, Nauka, 2018 [in Russian].