

**Компактный источник низкоэнергетических сильноточных
электронных пучков***П. П. Кизириди, Г. Е. Озур, А. Б. Марков*

Разработан компактный источник низкоэнергетических (до 30 кэВ) сильноточных (десятки кА) электронных пучков микросекундной длительности (2–4 мкс), который может быть использован в составе комбинированных многофункциональных установок научно-прикладного назначения, например, строящегося Сибирского кольцевого источника фотонов (СКИФ). Генерирование пучка осуществляется в диоде со взрывоэмиссионным катодом со встроенными в него 25-тью дуговыми источниками плазмы, иницируемых пробоем по поверхности диэлектрика. Использование дуговых источников плазмы позволяет иницировать взрывную эмиссию при относительно небольших ускоряющих напряжениях (от 7 кВ). Это, в свою очередь, дает возможность регулировки плотности энергии пучка в широком диапазоне (от 1,5 до 10 Дж/см²). Транспортировка пучка от катода к коллектору на требуемое расстояние (2–3 см), осуществляется в магнитном поле, создаваемом одиночным кольцевым постоянным магнитом.

Ключевые слова: сильноточные электронные пучки, взрывная эмиссия, многоканальное иницирование, пробой по поверхности диэлектрика, постоянный магнит.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-4-34-39

Введение

Воздействие низкоэнергетическим (до 30 кэВ) сильноточным (до 30 кА) электронным пучком (НСЭП) является проверенным методом поверхностной обработки металлических изделий [1–7]. Высокая плотность энергии (до 15 Дж/см²) и короткая длительность импульса (2–4 мкс) позволяют выделить энергию пучка в тонком (до нескольких микрон) поверхностном слое, доводя его до плавления и частичного испарения. Модифицированные с помощью НСЭП поверхностные

слои обладают улучшенными физико-химическими свойствами [8, 9]. Совмещая воздействие НСЭП с методами формирования тонких плёнок (например, при помощи магнетронного распыления) можно получать поверхностные сплавы с различными свойствами [10]. Исследование модифицированных слоёв и поверхностных сплавов осуществляется, в том числе, с использованием различных широко известных методов рентгеноструктурного и микроструктурного анализа [11, 12] после облучения и извлечения образца из рабочей камеры.

Изучение же процесса модификации поверхностных слоёв в реальном времени возможно с помощью синхротронного излучения. Синхротрон представляет собой электровакуумную установку с приблизительно кольцевой вакуумной камерой, в которой частицы ускоряются до скорости, близкой к скорости света, и рождают синхротронное излучение рентгеновского диапазона чрезвычайно высокой интенсивности. Частота посылок импульсов излучения на синхротроне составляет сотни кГц,

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

Марков Алексей Борисович, с.н.с., к.ф.-м.н.

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

Институт сильноточной электроники СО РАН.
Россия, 634055, г. Томск, пр-кт Академический, 2/3.

Статья поступила в редакцию 28 июня 2022 г.

© Кизириди П. П., Озур Г. Е., Марков А. Б., 2022

а длительность импульса – около 100 нс. По специальным каналам вывода, расположенным вдоль кольца по касательной к траектории движения электронов, синхротронное излучение направляется на экспериментальные станции, где расположены исследуемые образцы, на которые оказывается то или иное воздействие. Измерение отклика, порождаемого взаимодействием синхротронного излучения с образцом, дает возможность исследовать во времени, например, изменение фазового состава в поверхностном слое образца, как бы сделав про них фильм в замедленной съемке, что невозможно с помощью традиционных стационарных методов.

На данный момент, в г. Новосибирске осуществляется строительство источника синхротронного излучения (Сибирский кольцевой источник фотонов – СКИФ). Для возможного использования в одной из научных станций был разработан компактный источник низкоэнергетических сильноточных электронных пучков.

Традиционным для нас способом генерирования НСЭП является использование сильноточной электронной пушки со взрывоэмиссионным (многопроволочным медным) катодом и плазменным анодом на основе

сильноточного отражательного разряда [6–7]. В данной системе зажигание разряда и транспортировка пучка на расстояние 20–25 см осуществляется с помощью импульсного ведущего магнитного поля, которое создается секционированным соленоидом, расположенным вне вакуумной камеры. Применение описанного способа генерирования НСЭП в составе комбинированных многофункциональных установок научно-прикладного назначения является крайне проблематичным. В первую очередь, конструкция вакуумной камеры многофункциональной установки (рис. 1), в которой, как правило, расположено большое количество оборудования (источники заряженных частиц, плазмы, атомарных потоков и т. д.), делает невозможным использование импульсного секционированного соленоида (поместить его в камеру любой вакуумной установки не получится, поскольку это значительно ухудшит вакуумные условия). Создать ведущее магнитное поле для транспортировки пучка на расстояние 20–25 см можно, например, с помощью сборки из постоянных магнитов, однако данная конструкция получится достаточно массивной и неудобной. Кроме того, в данных условиях остается открытым вопрос формирования плазменного анода.

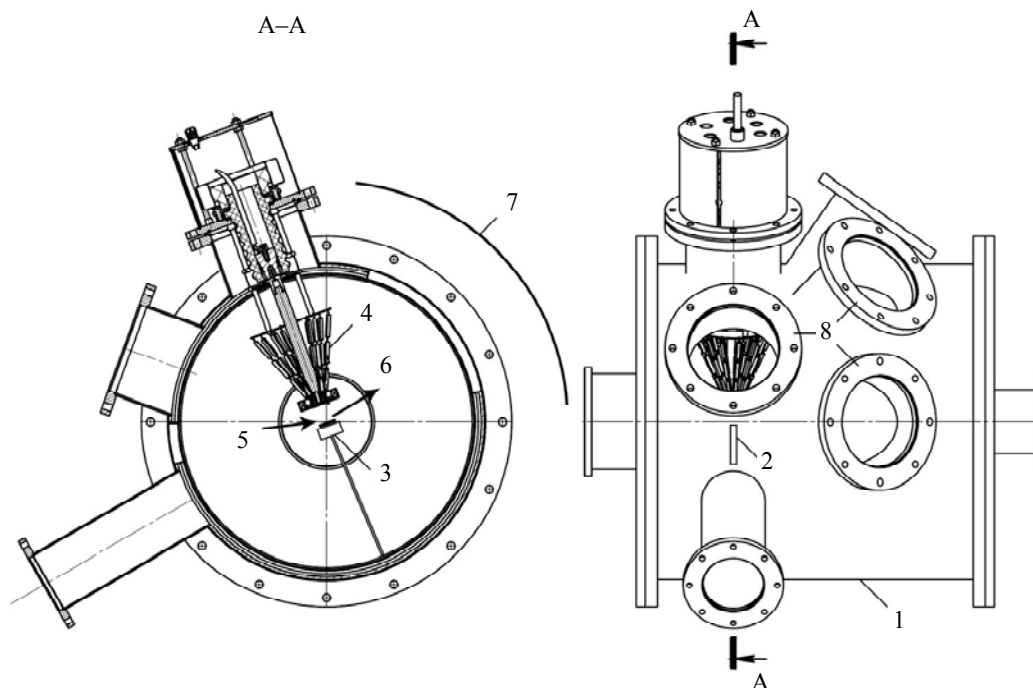


Рис. 1. Конструкция вакуумной камеры многофункциональной установки. 1 – корпус; 2 – щель для ввода синхротронного излучения; 3 – заземленный манипулятор с закрепленным на нем образцом; 4 – источник НСЭП; 5 – падающий рентгеновский луч; 6 – отраженный луч; 7 – анализатор отраженного луча; 8 – фланцы для установки другого оборудования

Ранее нами был предложен метод иницирования взрывной эмиссии путём встраивания в дисковый катод резистивно развязанных дуговых источников плазмы [13, 14]. Было показано, что такой взрывоэмиссионный катод может быть эффективно использован не только в условиях плазмонаполненного диода, но и в условиях вакуумного или газонаполненного диода, когда длина межэлектродного зазора (катод – облучаемый образец) составляет единицы сантиметров (2–3 см). Транспортировать пучок на такие расстояния можно, например, с помощью одиночного постоянного магнита (например, из Nd-Fe-B). Нами экспериментально установлено, что ми-

нимальная, достаточная для транспортировки пучка, величина индукции ведущего магнитного поля, B_z , составляет 0,04 Тл. Результаты предварительного моделирования, выполненного нами в среде COMSOL Multiphysics, показали, что кольцевой магнит из Nd-Fe-B (размер – 66×46×12, остаточная индукция на поверхности – 1,1 Тл) обеспечивает необходимую величину B_z на расстоянии 3 см от него.

Описание экспериментального стенда

На рис. 2 представлена конструкция разработанного нами источника НСЭП.

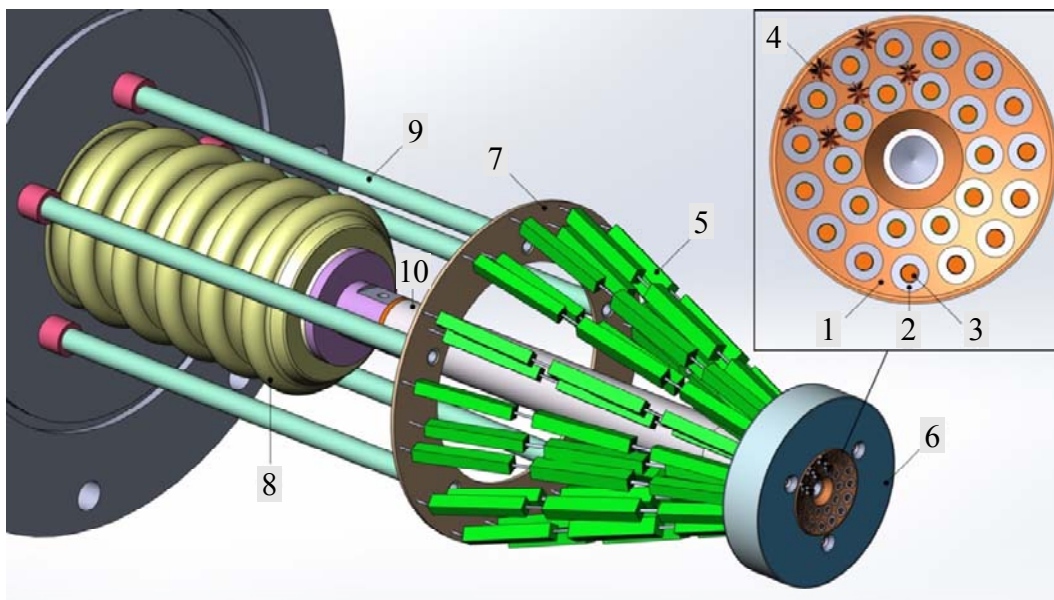


Рис. 2. Конструкция компактного источника НСЭП: 1 – катод; 2 – керамические трубки ($\varnothing 4$ мм); 3 – медные электроды ($\varnothing 2$ мм); 4 – пучки медных проволок (80 мкм); 5 – резисторы ТВО-2; 6 – постоянный магнит в коробе из нержавеющей стали; 7 – контактное кольцо; 8 – изолятор ввода ускоряющего напряжения; 9 – стойки заземления; 10 – катододержатель

Источник 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. Каждый из 25-ти электродов (межцентровое расстояние составляет 5,5 мм) заземлен на контактное кольцо 7 через резисторы 5 сопротивлением около 2,2 кОм (три последовательно соединенных резистора номиналом 750 Ом каждый). Для увеличения количества взрывоэмиссионных центров в катод (по всей поверхности) также впрессованы пучки тонких (80 мкм) медных проволок 4.

Необходимую величину индукции ведущего магнитного поля обеспечивает постоянный магнит из Nd-Fe-B, зафиксированный в коробе из нержавеющей стали 6, который электрически соединен с катодом.

При подаче на катод импульса напряжения отрицательной полярности амплитудой от 7 до 30 кВ происходит пробой по поверхности торцов керамических трубок, и возникает плазма, состоящая из материалов катода (катодные пятна), керамических трубок и электродов, а также ионизованного десорбированного газа. Образование катодных пятен (взрывоэмиссионных центров) при протека-

нии тока через поджигающие промежутки (эти пятна можно назвать затравочными) обеспечивается тем, что амплитуда тока через каждый промежуток превышает так называемый пороговый ток дуги [15], который составляет от долей до единиц ампер практически для всех материалов. Электроны, эмитируемые затравочными, а также возникшими в течение импульса катодными пятнами, ускоряются к заземленному коллектору.

Измерения параметров пучка проводились на прототипе, описанном в [13, 14]. Распределение плотности энергии по сечению пучка и полная энергия, выделяющаяся в мишени, определялись из термограмм, полученных с помощью тепловизора **TESTO 875-1**, по методике, описанной в [16]. В качестве тепловизионной мишени (ее диаметр 11 см) использовалась фольга из нержавеющей стали толщиной 200 мкм, обращенная к тепловизору сторона которой была покрыта черной матовой краской.

Регистрация импульсов ускоряющего напряжения осуществлялась с помощью активного делителя, тока катода и тока пучка на коллектор – поясами Роговского. Сигналы с датчиков подавались на входы 4-канального широкополосного (200 МГц) цифрового осциллографа **Tektronix TDS 2024**.

Эксперименты проводились как в условиях вакуумного диода (давление остаточного газа, $p = 0,1$ мТорр), так и при напуске рабочего газа (воздух/аргон) до давления 0,4–0,7 мТорр.

Результаты экспериментов и обсуждение

На рис. 3 приведены типичные осциллограммы импульсов напряжения и токов.

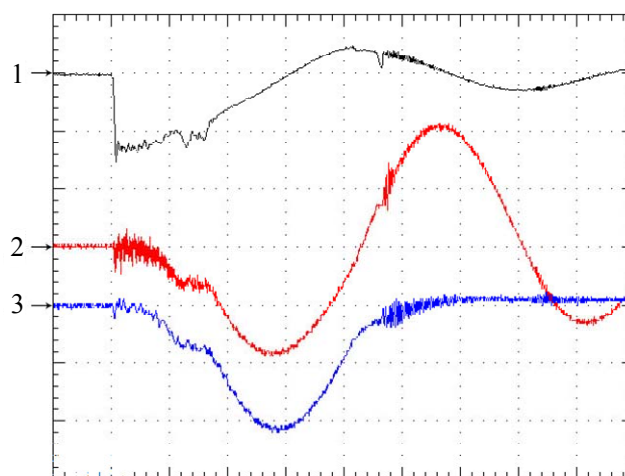


Рис. 3. Типичные осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения (1-й канал, 10 кВ/дел), полного тока катода (2-й канал, 12 кА/дел) и тока пучка на коллектор (3-й канал, 10 кА/дел). Давление воздуха, $p_{\text{воздух}} = 0,6$ мТорр. Зарядное напряжение генератора высоковольтных импульсов, $U_{\text{зар}} = 12$ кВ

Отметим, что, как и прежде [14], стабильность (повторяемость) осциллограмм от импульса к импульсу сохранилась на высоком уровне. Близкими к [17] оказались и результаты тепловизионных измерений (с поправкой на площадь рабочей поверхности катода). На рис. 4 представлены термограмма и соответствующие ей распределения плотности энергии пучка в двух сечениях.

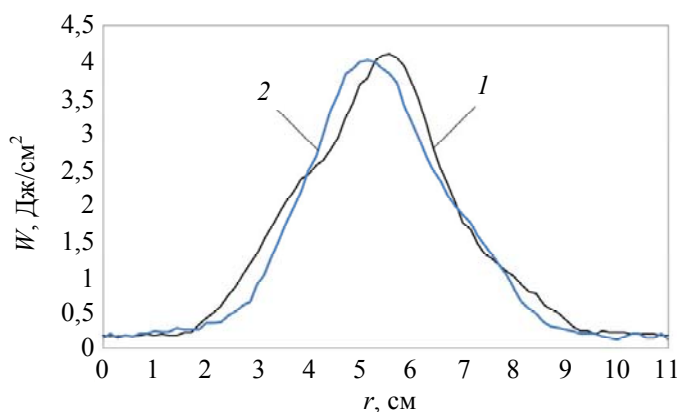
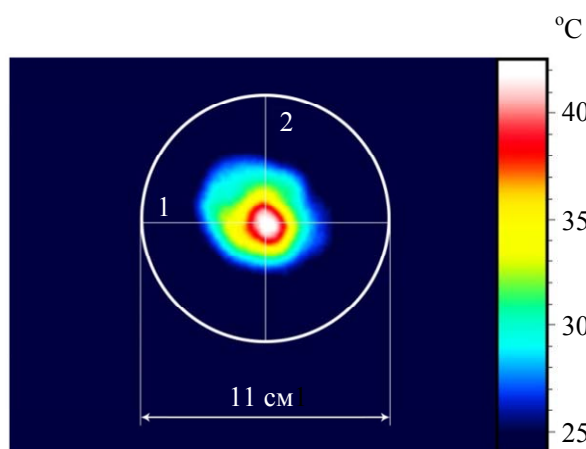


Рис. 4. Термограмма (слева) и соответствующее ей распределение плотности энергии пучка в двух сечениях (справа). Давление воздуха, $p_{\text{воздух}} = 0,6$ мТорр. Зарядное напряжение генератора высоковольтных импульсов, $U_{\text{зар}} = 12$ кВ

Из рис. 4 видно, что, несмотря на относительно небольшое зарядное напряжение, $U_{зар} = 12$ кВ, максимальная величина плотности энергии, W_{max} , составляет около 4 Дж/см², что превышает пороги плавления титановых сплавов, стали и многих других металлических материалов [7]. Величина полной энергии пучка, E , выделяющейся в мишени, в данном случае составляет 52,6 Дж. При повышении $U_{зар}$ данные величины закономерно возрастают. Например, при $U_{зар} = 17$ кВ они равны 5,3 Дж/см² и 70 Дж. При напуске в камеру аргона были получены близкие результаты. В случае вакуумного диода величины W_{max} и E оказались примерно на 10–15 % ниже. Следует отметить, что даже при $U_{зар} = 5–7$ кВ источник демонстрирует относительно стабильную работу, однако погрешность измерения величин W_{max} и E увеличивается.

Заключение

Разработан компактный источник низкоэнергетических (5–30 кэВ) сильноточных (до 25 кА) электронных пучков микросекундной длительности. Использование дуговых источников плазмы, встроенных в катод, позволяет инициировать взрывную эмиссию при относительно небольших ускоряющих напряжениях (от 7 кВ), что дает возможность плавной регулировки плотности энергии пучка в широком диапазоне (от 1,5 до 10 Дж/см²). Кроме того, данный способ инициирования взрывной эмиссии не требует создания плазменного анода, т. е. обеспечивает генерирование сильноточного электронного пучка в режиме вакуумного или газонаполненного диода. Показано, что достаточное для транспортировки пучка ведущее магнитное поле (около 0,04 Тл) может быть создано одиночным постоянным кольцевым магнитом, что в сочетании с отсутствием плазменного анода позволяет существенно уменьшить габариты источника и повысить его надежность. Предполагается использовать источник в составе научной станции строящегося Сибирского кольцевого источника фотонов.

*Работа выполнена в рамках проекта
«In situ методы синхротронных исследований*

многослойных функциональных структур с уникальными параметрами и свойствами, созданных пучково-плазменной инженерией поверхности» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-1348 от 05.10.2021 г.).

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Uno Y., Okada A., Uemura K., Raharjo P., Sano S., Yu Z., Mishima S. // J. of Mater. Process. Techn. 2007. Vol. 187–188. P. 77.
3. Murray J. W., Clare A. T. // J. of Materials Processing Techn. 2012. Vol. 212. P. 2642.
4. Li M. C., Hao S. Z., Wen H., Huang R. F. // Applied Surface Science. 2014. Vol. 303. P. 350.
5. Zou J., Zhang K., Dong C., Qin Y., Hao S., Grosdidier T. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. № 4. P. 041913.
6. Озур Г. Е., Проскуровский Д. И. // Источники низкоэнергетических сильноточных электронных пучков с плазменным анодом: Монография. – Новосибирск: Наука, 2018.
7. Ротштейн В. П., Проскуровский Д. И., Озур Г. Е., Иванов Ю. Ф. Модификация поверхностных слоев металлических материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками. – Новосибирск: Наука, 2019.
8. Гренадёр А. С., Соловьёв А. А., Оскомов К. В., Яковлев Е. В. // Прикладная физика. 2021. № 6. С. 53.
9. Семин В. О., Мейснер Л. Л., Нейман А. А., Яковлев Е. В. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2020. № 4. С. 84.
10. Иванов Ю. Ф., Громов В. Е., Загуляев Д. В., Коновалов С. В., Рубанникова Ю. А. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 2. С. 129.
11. Уманский Я. С., Скаков Ю. А., Иванов А. Н., Расторгуев Л. Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. – М.: Металлургия. 1982.
12. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. Рентгенографический и электроннооптический анализ. – М.: Металлургия, 1971.
13. Кизириди П. П., Озур Г. Е. // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. № 15. С. 47.
14. Kiziridi P. P., Ozur G. E. // Vacuum. 2021. Vol. 194. P. 110560.
15. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. – М.: Наука, 1968.
16. Кизириди П. П., Марков А. Б., Озур Г. Е., Фролова В. П. // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 3/2. С. 114.
17. Кизириди П. П., Озур Г. Е. // ЖТФ. 2022. Т. 92. № 6. С. 876.

Compact source of low-energy, high-current electron beams

P. P. Kiziridi, G. E. Ozur, and A. B. Markov

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

Received June 28, 2022

A compact source of low-energy (up to 30 keV), high-current electron beams (tens of kA) of microsecond duration (2–4 μs), which can be used in hybrid multifunctional scientific-applicable facilities, for example, projected Siberian Ring Source of Photons (SRSP) has been developed. Beam production is performed in a diode with explosive-emission cathode in which 25 arc plasma sources initiated by dielectric surface flashover are built-in. The use of arc plasma sources allows one to excite explosive emission at relatively low accelerated voltages (from 7 kV). It provides a possibility to vary the beam energy density in a wide range (from 1.5 to 10 J/cm²). The beam transportation onto the collector through the distance of 2–3 cm is performed in a guide magnetic field provided by a single ring permanent magnet.

Keywords: high-current electron beams, explosive emission, multi-channel initiation, dielectric surface flashover, permanent magnet.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-4-34-39

REFERENCES

1. L. L. Meisner, V. P. Rotshtein, V. O. Semin, S. N. Meisner, A. B. Markov, E. V. Yakovlev, F. A. D'yachenko, A. A. Neiman, and E. Yu. Gudimova, *Surface & Coatings Technology* **404**, 12644 (2020).
2. Y. Uno, A. Okada, K. Uemura, P. Raharjo, S. Sano, Z. Yu, and S. Mishima, *J. of Mater. Process. Techn.* **188**, 77 (2007).
3. J. W. Murray and A. T. Clare, *J. of Materials Processing Techn.* **212**, 2642 (2012).
4. M. C. Li, S. Z. Hao, H. Wen, and R. F. Huang, *Applied Surface Science* **303**, 350 (2014).
5. J. Zou, K. Zhang, C. Dong, Y. Qin, S. Hao, and T. Grosdidier, *Appl. Phys. Lett.* **89** (4), 041913 (2006).
6. G. E. Ozur and D. I. Proskurovsky, *Sources of low-energy, high-current electron beams with plasma anode*. (Nauka, Novosibirsk, 2018).
7. V. P. Rotshtein, D. I. Proskurovsky, G. E. Ozur, and Yu. F. Ivanov, *Surface modification of metallic materials with low-energy, high-current electron beams*. (Nauka, Novosibirsk, 2019).
8. A. S. Grenadyorov, A. A. Soloviev, K. V. Oskomov, and E. V. Yakovlev, *Applied Physics*, No. 6, 53 (2021) [in Russian].
9. V. O. Semin, L. L. Meisner, A. A. Neiman, and E. V. Yakovlev, *Surface. X-Ray, synchrotron and neutron research*, No. 4, 84 (2020).
10. Yu. F. Ivanov, V. E. Gromov, D. V. Zagulyaev, S. V. Konovalov, and Yu. A. Rubannikova, *Izvestia vuzov. Ferrous metallurgy* **64** (2), 129 (2021).
11. Ya. S. Umansky, Yu. A. Skakov, A. N. Ivanov, and L. N. Rastorguyev, *Crystallography, radiography and electron microscopy*. (Metallurgy, Moscow, 1982).
12. S. S. Gorelik, L. N. Rastorguyev, and Yu. A. Skakov, *Radiographic and electron-optical analysis*. (Metallurgy, Moscow, 1971).
13. P. P. Kiziridi and G. E. Ozur, *Technical Physics Letters* **46** (15), 47 (2020).
14. P. P. Kiziridi and G. E. Ozur, *Vacuum* **194**, 110560 (2021).
15. I. G. Kesaev, *Cathode processes of vacuum arc*. (Nauka, Moscow, 1968).
16. P. P. Kiziridi, A. B. Markov, G. E. Ozur, and V. P. Frolova, *Russian Physics Journal* **57** (3/2), 114 (2014).
17. P. P. Kiziridi and G. E. Ozur, *Technical Physics* **92** (6), 876 (2022).