

**RIBBON ELECTRON BEAM SOURCE OPERATING  
IN A WIDE PRESSURE RANGE**

*Aleksandr Sergeevich Klimov<sup>1</sup>, Ilya Yurevich Bakeev<sup>1</sup>, Joel Eric Dagri<sup>1</sup>,  
Anna Viktorovna Dolgova<sup>1</sup>, Aleksey Aleksandrovich Zenin<sup>1</sup>, Efim Mihailovich Oks<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Lenin pr. 40, 634050, Tomsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences., Academichesky pr. 2/3, 634055, Tomsk, Russia

<sup>a</sup> klimov680@gmail.com

**ABSTRACT**

The design and basic parameters of an electronic source forming a ribbon electron beam in the pressure range from  $10^{-2}$  to 10 Pa are presented. The beam current reaches 450 mA, with the electron energy of the beam up to 8 kV. The dimensions of the electron beam in the beam cross section are  $10 \times 220$  mm<sup>2</sup>. Working gases – helium, argon, residual atmosphere. The expansion of the pressure range is provided by the use of two discharge systems – the main and auxiliary, between which there is a pressure difference. The auxiliary discharge system operates at a pressure of one Pascal and serves for maintaining the discharge in the main system operating in high vacuum by supplying it with charged particles. Both the main and auxiliary systems use glow discharges with a hollow cathode. The uniformity of the beam current distribution over its cross-section is ensured by using a special design of the emission electrode located in the anode of the main discharge system. The degree of inhomogeneity of the electron beam current density distribution does not exceed 15% in length. The obtained parameters of the electron beam are promising from the point of view of generating a beam plasma, initiating a beam-plasma discharge and using it for the implementation of plasma chemical processing of materials.

**KEYWORDS**

Plasma emission; current density; uniformity; forevacuum; ribbon beam source.

**ЛЕНТОЧНЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА,  
ФУНКЦИОНИРУЮЩИЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ**

*Александр Сергеевич Климов<sup>1а</sup>, Илья Юрьевич Bakeev<sup>1</sup>,  
Жоэль-Эрик Дагри<sup>1</sup>, Анна Викторовна Долгова<sup>1</sup>,  
Алексей Александрович Зенин<sup>1</sup>, Ефим Михайлович Окс<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 40

<sup>2</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3

<sup>a</sup> klimov680@gmail.com

## АННОТАЦИЯ

Представлена конструкция и основные параметры электронного источника, формирующего ленточный электронный пучок в диапазоне давлений от  $10^{-2}$  до 10 Па. Ток пучка достигает 450 мА при энергии электронов пучка до 8 кВ. Размеры электронного пучка в поперечном сечении  $10 \times 220$  мм<sup>2</sup>. Рабочие газы – гелий, аргон, остаточная атмосфера. Расширение диапазона давлений обеспечивается использованием двух разрядных систем – основной и вспомогательной, между которыми существует перепад давлений. Вспомогательная разрядная система функционирует при давлении единицы паскаль и служит поставщиком заряженных частиц для поддержания разряда в основной системе, работающей в высоком вакууме. Как в основной, так и в вспомогательной системах используются тлеющие разряды с полым катодом. Однородность распределения тока пучка по его сечению обеспечивается использованием специальной конструкции эмиссионного электрода, расположенного в аноде основной разрядной системы. Степень неоднородности распределения плотности тока электронного пучка не превышает 15% по длине. Полученные параметры электронного пучка являются перспективными с точки зрения генерации пучковой плазмы, инициирования пучково-плазменного разряда и использования его для реализации плазмохимической обработки материалов.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Эмиссия из плазмы; плотность тока; однородность; форвакуум; источник ленточного пучка.

### Введение

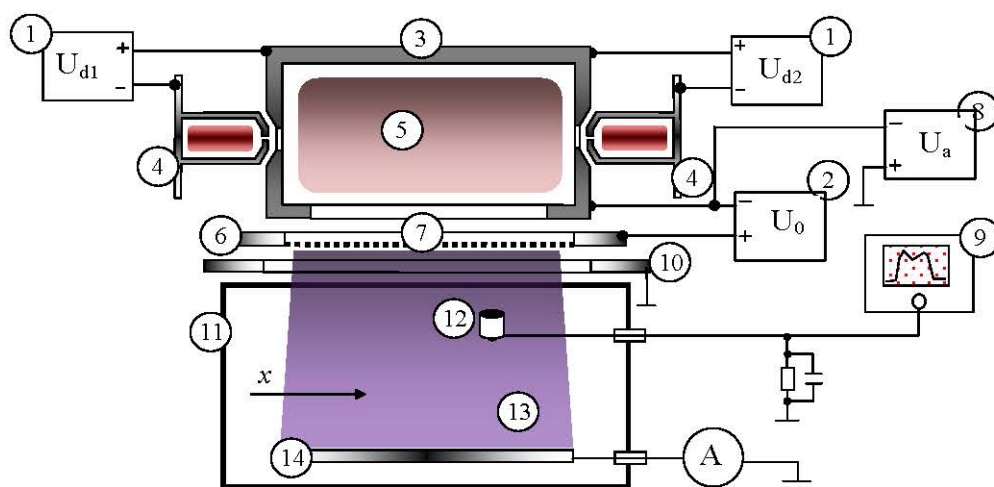
Плазменная обработка материалов нашла применение в таких областях промышленности как микроэлектроника, медицина, сельское хозяйство и др. [1–10]. В настоящее время существуют разные способы генерации плазмы – с использованием разрядов различных частотных диапазонов, а также ионизацией газа за счет прохождения через него ускоренного электронного пучка, так называемой электронно-пучковой плазмы [11–13]. Параметры такой плазмы (концентрация, температура электронов и ионов и др.) контролируются практически независимо за счет изменения параметров электронного пучка рода и давления газа в вакуумной камере [14]. При этом для технологических целей важным является объем созданного плазменного образования. Для повышения объема плазмы используются электронные пучки большого сечения, в том числе и ленточные инжектируемые в область генерации пучковой плазмы [15]. Давление в области

генерации электронного пучка, как правило, на порядок и более отличается от давления в рабочей камере генератора пучковой плазмы. В генераторах используются источники с протяженным термокатодом, критичные к перепаду давлений и требующие создания перепада давления в несколько порядков [16]. Использование плазменного катода снижает разницу давлений между областями генерации электронного пучка и плазмы, однако достигнутые рабочие давления таких источников не превышают 0,1 Па. Для повышения эффективности обработки и осуществления плазмохимических технологий оптимальная область рабочих давлений плазмообразующего газа лежит в пределах  $p \approx 0,01$ –1 Па [17], что превышает достигнутый на данный момент рабочий диапазон давлений источников. Форвакуумные плазменные электронные источники способны функционировать при давлениях превышающих требуемый диапазон. Специальная конструкция ускоряющего промежутка позволяет генерировать

электронные пучки и пучковую плазму при давлениях 1–100 Па [18–20]. Нижний предел рабочего давления в источниках такого типа ограничен погасанием разряда при снижении давления до единиц паскаль. Напуск газа в полый катод способен решить проблему поддержания разряда, однако создать перепад давлений на протяженной эмиссионной щели таких источников не представляется возможным. Одним из способов расширения диапазона рабочих давлений может быть комбинация нескольких разрядных систем [21, 22]. В настоящей работе для поддержания работы форвакуумного плазменного источника ленточного электронного пучка в области давлений 0,01–1 Па используется комбинация двух разрядных систем, основанных на разряде с полым катодом. Представлена конструкция источника, основные параметры электронного пучка при работе в различном диапазоне давлений.

### 1. Описание экспериментальной установки и методики

Схематичное изображение форвакуумного плазменного источника ленточного электронного пучка представлено на рис. 1. Электродная система источника представлена двумя разрядными системами. Основная разрядная система состоит из цилиндрического полого катода длиной 250 мм и диаметром полости 100 мм с протяженной щелью в боковой стенке и плоского анода с эмиссионным окном размерами  $250 \times 10 \text{ мм}^2$ . Вспомогательная разрядная система состояла из цилиндрических полых катодов меньшего размера – диаметром 40 мм и длиной 120 мм. Катоды устанавливались на торцах катода основного разряда, в которых имелись отверстия диаметром 1 мм для проникновения частиц плазмы из полости вспомогательных разрядов в катодную полость основного разряда.



**Рис. 1.** Схема источника и измерение его параметров:

- 1 – источник питания вспомогательного разряда; 2 – источник питания основного разряда; 3 – полый анод;
- 4 – полый катод вспомогательного разряда; 5 – плазма основного разряда; 6 – плоский анод основного разряда;
- 7 – эмиссионная сетка; 8 – блок ускоряющего напряжения; 9 – осциллограф; 10 – ускоряющий электрод;
- 11 – вакуумная камера; 12 – токовый коллектор или зонд Ленгмюра; 13 – электронный пучок;
- 14 – коллектор электронного пучка

**Fig. 1.** Diagram of the source and measurement of its parameters:

- 1 – auxiliary discharge power supply; 2 – main discharge power supply; 3 – hollow anode;
- 4 – hollow cathode of auxiliary discharge; 5 – plasma of the main discharge; 6 – flat anode of the main discharge;
- 7 – emission grid; 8 – accelerating voltage unit; 9 – oscilloscope; 10 – accelerating electrode; 11 – vacuum chamber;
- 12 – current collector or Langmuir probe; 13 – electron beam; 14 – electron beam collector

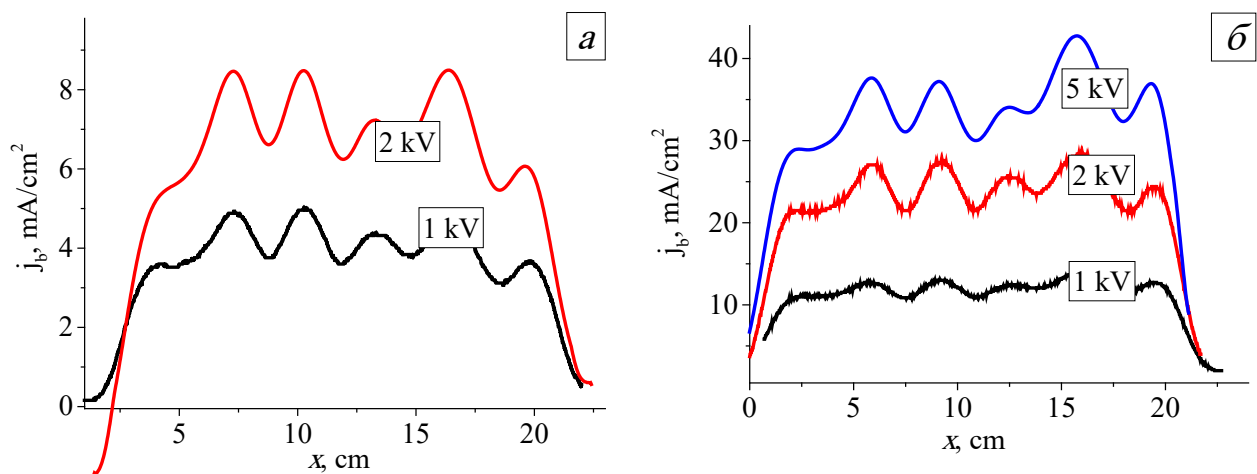
Напуск рабочего газа (аргон, гелий, воздух и др.) осуществлялся в полые катоды вспомогательных разрядов и контролировался регулятором расхода газа РРГ-12. Вспомогательная разрядная система обеспечивала инжекцию электронов в основной разряд в случае работы источника при давлениях  $10^{-1}$ – $2 \cdot 10^{-2}$  Па. В форвакуумной области давлений (1–10 Па) вспомогательная разрядная система не использовалась. При работе в области низких давлений сначала зажигались вспомогательные разряды, а затем основной. Электрическое питание основного и вспомогательных разрядов осуществлялось блоками стабилизированного напряжения с возможностью регулировки тока от 10 до 600 мА для вспомогательных разрядов и до 1200 мА для основного разряда. Напряжение холостого хода источников не превышало 2 кВ. Для формирования электронного пучка и ускорения электронов использовался

источник высокого напряжения с диапазоном тока от 10 до 500 мА и напряжением от 0,1 до 10 кВ.

Для исследования распределения плотности тока электронного пучка использовался малый коллектор тока, подключаемый к цифровому запоминающему осциллографу Tektronix 2024В. Расстояние от приемной части малого коллектора до эмиссионной сетки источника составляло 20 см.

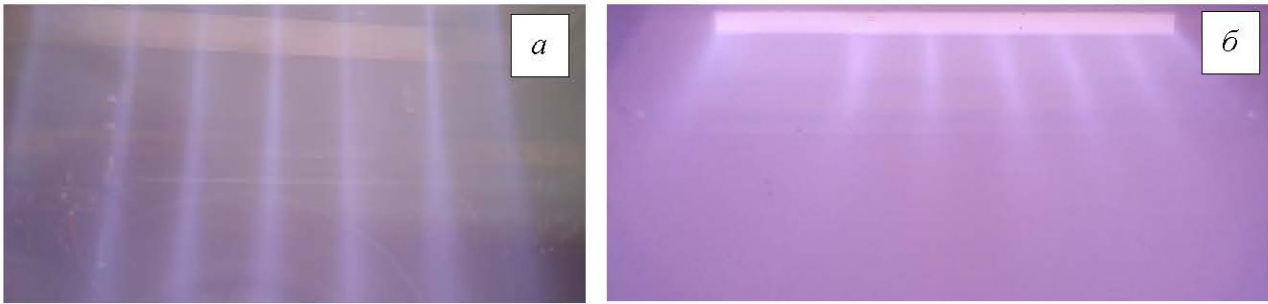
## 2. Результаты и дискуссия

Распределения плотности тока электронного пучка, измеренные на расстоянии 20 см от выходной апертуры источника, представлены на рис. 2. Как можно заметить распределения содержат участки с более высоким, по сравнению со средним, значением плотности тока. Фотографии свечения пучковой плазмы также это иллюстрируют (рис. 3).



**Рис. 2.** Распределение плотности тока пучка для различных ускоряющих напряжений и давления:  $a - 2 \times 10^{-2}$  Па;  $b - 10$  Па. Ток основного разряда 1,2 А. Рабочий газ аргон

**Fig. 2.** Beam current density distribution for various accelerating voltages and pressures:  $a - 2 \times 10^{-2}$  Pa;  $b - 10$  Pa. The main discharge current is 1.2 A. The working gas is argon

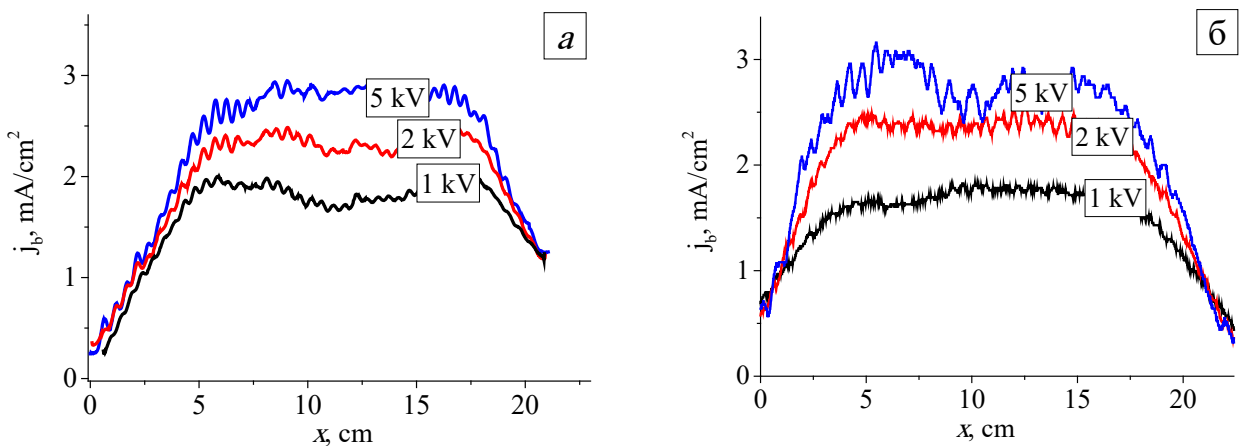


**Рис. 3.** Фотография электронного пучка при различных давлениях:  
*a* –  $2 \times 10^{-2}$  Па; *б* – 10 Па. Ток основного разряда 1,2 А. Рабочий газ аргон

**Fig. 3.** Photo of an electron beam at various pressures:  
*a* –  $2 \times 10^{-2}$  Pa; *b* – 10 Pa. The main discharge current is 1.2 A. The working gas is argon

Причем положение максимумов в распределении оказалось не зависимым от параметров разряда, рода и давления газа, но зависело от расстояния до электронного источника. С увеличением расстояния от электронного источника за счет рассеяния электронов пучка распределение становилось более однородным. Кроме того было замечено что при использовании новой эмиссионной сетки максимумы в распределении плотности тока не проявляются, однако после продолжительной работы в течение нескольких часов проявляются вновь. Такое поведение, на наш взгляд, связано с измене-

нием кривизны сетки в отдельных ее местах за счет нагрева обратным ионным потоком имеющим место при работе электронного источника. Для повышения однородности распределения плотности тока было предложено заменить протяженную щель в аноде источника на серию отверстий диаметром 5 мм расположенных вдоль одной линии (многоапертурная система извлечения). Использование такой многоапертурной системы извлечения в аноде позволило снизить неоднородность в распределении плотности тока до значений не более 10% от средней величины, рис. 4.



**Рис. 4.** Распределение плотности тока пучка при использовании многоапертурной системы для различных ускоряющих напряжений и давления:  
*a* –  $2 \times 10^{-2}$  Па; *б* – 10 Па. Ток основного разряда 1,2 А. Рабочий газ аргон

**Fig. 4.** Distribution of the beam current density when using a multi-aperture system for various accelerating voltages and pressures:  
*a* –  $2 \times 10^{-2}$  Pa; *b* – 10 Pa. The main discharge current is 1.2 A. The working gas is argon



## Выводы

Использование двухступенчатой разрядной системы позволяет расширить диапазон рабочих давлений форвакуумного плазменного электронного источника в область более низких (до  $10^{-2}$  Па) значений. Формируемый при этом электронный пучок имеет размеры в поперечном сечении  $10 \times 220$  мм<sup>2</sup>, ток до 450 мА (при работе на гелии) и ускоряющее напряжение до 8 кВ. Использование эмиссионного электрода в виде пластины с серией отверстий, перекрытых мелкоструктурной металлической сеткой, позволяет снизить неоднородность до величины не более 15% от среднего значения (погрешность аппаратной части не превышала 5%). Полученные параметры электронного пучка являются перспективными с точки зрения генерации пучковой плазмы и инициирования пучково-плазменного разряда.

## Благодарности / Acknowledgments

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства высшего образования и науки Российской Федерации, грант № FEWM-2023-0012.*

*The work was supported by the Ministry of Higher Education and Science, grant No. FEWM-2023-0012.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Vasiliev M., Vasilieva T. Beam plasmas: materials production // Encyclopedia of Plasma Technology: Two Volume Set. CRC Press, 2016. P. 152–166. DOI: 10.1081/E-EPLT-120054010.
- Pukhova I. V., Savkin K. P., Laput O. A., Lytkina D. N., Botvin V. V., Medovnik A. V., Kurzina I. A. Effects of ion-and electron-beam treatment on surface physicochemical properties of polylactic acid // Applied Surface Science. 2017. V. 422. P. 856–862. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.06.112.
- Vasilieva T. M., Lopatin S., Varlamov V., Miasnikov V. Hydrolysis of chitin and chitosan in low temperature electron-beam plasma // Pure and Applied Chemistry. 2016. V. 88, Iss. 9. P. 873–879. DOI: 10.1515/pac-2016-0603.
- Walton S. G., Hernandez S. C., Boris D. R., Lock E. H., Petrov G. M., Petrova Tz. B., Fernsler R. F. Electron beam generated plasmas for the processing of graphene // Journal of Physics D: Applied Physics. 2017. V. 50, Iss. 35. Article number 354001. DOI: 10.1088/1361-6463/aa7d12.
- Walton S. G., Boris D. R., Hernandez S. C., Lock E. H., Petrova Tz. B., Petrov G. M., Fernsler R. F. Electron beam generated plasmas for ultra low Te processing // ECS Journal of Solid State Science and Technology. 2015. V. 4, Iss. 6. Article number N5033. DOI: 10.1149/2.0071506jss.
- Dorf L., Wang J.-C., Rauf S., Monroy G. A., Zhang Y., Agarwal A., Kenney J., Ramaswamy K., Collins K. Etching with atomic precision by using low electron temperature plasma // Journal of Physics D: Applied Physics. 2017. V. 50, Iss. 27. Article number 274003. DOI: 10.1088/1361-6463/aa7357.
- Walton S. G., Boris D. R., Hernández S. C., Lock E. H., Petrova Tz. B., Petrov G. M., Jagtiani A. V., Engelmann S. U., Miyazoe H., Joseph E. A. Electron beam generated plasmas: Characteristics and etching of silicon nitride // Microelectronic Engineering. 2017. V. 168. P. 89–96. DOI: 10.1016/j.mee.2016.11.003
- Shustin E. G. Plasma technologies for material processing in nanoelectronics: Problems and solutions // Journal of Communications Technology and Electronics. 2017. V. 62, Iss. 5. P. 454–465. DOI: 10.1134/S106422691704012X.
- Marchack N., Buzi L., Farmer D. B., Miyazoe H., Papalia J. M., Yan H., Totir G., Engelmann S. U. Plasma processing for advanced microelectronics beyond CMOS // Journal of Applied Physics. 2021. V. 130, Iss. 8. Article number 080901. DOI: 10.1063/5.0053666.
- Li C., Hofmann Th., Edinger K., Godyak V., Oehrlein G. S. Etching of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> induced by electron beam plasma from hollow cathode plasma in a downstream reactive environment // Journal of Vacuum Science & Technology B. 2020. V. 38, Iss. 3. Article number 032208. DOI: 10.1116/1.5143538.
- Akhmadeev Y. H., Denisov V. V., Koval N. N., Kovalsky S. S., Lopatin I. V., Schanin P. M., Yakovlev V. V. Generation of uniform low-temperature plasma in a pulsed non-self-sustained glow discharge with a large-area hollow cathode // Plasma Physics Reports. 2017. V. 43, Iss. 1. P. 67–74. DOI: 10.1134/S1063780X17010020.
- Gavrilov N. V., Men'shakov A. I. Generation of a pulsed high-current low-energy beam in a plasma electron source with a self-heated cathode // Technical Physics. 2016. V. 61, Iss. 5. P. 669–675. DOI: 10.1134/S1063784216050066.
- Gavrilov N. V., Kamenetskikh A. S., Emlin D. R., Tretnikov P. V., Chukin A. V. Discharge system with a self-heated hollow cathode and an evaporating anode

in a cusp magnetic field for oxide coatings deposition // *Technical Physics*. 2019. V. 64, Iss. 6. P. 807–813. DOI: 10.1134/S1063784219060082.

14. Akishev Y., Machala Z., Koval N. Special issue on recent developments in plasma sources and new plasma regimes // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2019. V. 52, Iss. 13. Article number 130301. DOI: 10.1088/1361-6463/ab0004.

15. Leonhardt D., Walton S. G., Fernsler R. F. Fundamentals and applications of a plasma-processing system based on electron-beam ionization // *Physics of plasmas*. 2007. V. 14, Iss. 5. Article number 057103. DOI: 10.1063/1.2712424.

16. Kurnaev V. A., Peskov V. V., Chmil' A. I., Shustin E. G. Ion flux onto a nonconducting surface in a beam-plasma discharge: Simulation and experiment // *Plasma physics reports*. 2010. V. 36, Iss. 13. P. 1177–1180. DOI: 10.1134/S1063780X10130143.

17. Smullin L. D. A review of the beam plasma discharge // *Relation Between Laboratory and Space Plasmas: Proceedings of the International Workshop held at Gakushi-Kaikan (University Alumni Association), (Tokyo, Japan, April 14–15, 1980)*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1981. P. 45–65. DOI: 10.1007/978-94-009-8440-0\_4.

18. Burdovitsin V. A., Oks E. M. Fore-vacuum plasma-cathode electron sources // *Laser and particle*

beams. 2008. V. 26, Iss. 4. P. 619–635. DOI: 10.1017/S0263034608000694.

19. Walton S. G., Boris D. R., Rosenberg S. G., Rosenberg H., Joseph E. A., Engelmann S. Etching with electron beam-generated plasmas: Selectivity versus ion energy in silicon-based films // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 2021. V. 39, Iss. 3. Article number 033002. DOI: 10.1116/6.0000868.

20. Malkin A. M., Zaslavsky V. Yu., Zheleznov I. V., Goykhman M. B., Gromov A. V., Palitsin A. V., Sergeev A. S., Fedotov A. É., Makhlov P. B., Ginzburg N. S. Development of high-power millimeter-wave surface-wave generators based on relativistic ribbon electron beams // *Radiophysics and quantum electronics*. 2020. V. 63, Iss. 1. P. 458–468. DOI: 10.1007/s11141-021-10071-1.

21. Li L., Wang J., Wang Y. Generation of high-current-density sheet electron beams // *IEEE electron device letters*. 2009. V. 30, Iss. 3. P. 228–230. DOI: 10.1109/LED.2008.2010783.

22. Gushenets V. I., Koval N., Schanin P. M., Tolkachev V. S. Nanosecond high current and high repetition rate electron source // *IEEE transactions on plasma science*. 1999. V. 27, Iss. 4. P. 1055–1059. DOI: 10.1109/DEIV.1998.738831.