

Физическая электроника

Научная статья

УДК 537.533

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17107>

ТОКОВЫЕ И СКОРОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ, ФОРМИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОННО- ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С МНОГООСТРИЙНЫМ ПОЛЕВЫМ ЭМИТТЕРОМ

Е. П. Тарадаев ✉, **Г. Г. Соминский**, **С. П. Тарадаев**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

✉ evgeny_tar@hotmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты исследований характеристик электронных потоков, формируемых электронно-оптической системой с многоострийным полевым эмиттером. Была получена информация о важных параметрах пучка: токе в пучке, спектре скоростей электронов, питч-факторе. Разброс по поперечной скорости не превышал 50 % в исследованных режимах. Форма спектров не зависела от величины магнитного поля и проявляла лишь слабую зависимость от тока в пучке.

Ключевые слова: полевая эмиссия, многоострийный полевой эмиттер, электронный поток, скоростной разброс

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-29-00224.

Для цитирования: Тарадаев Е. П., Соминский Г. Г., Тарадаев С. П. Токовые и скоростные характеристики электронных потоков, формируемых электронно-оптической системой с многоострийным полевым эмиттером // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2024. Т. 17. № 1. С 64–70. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17107>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17107>

CURRENT AND SPEED CHARACTERISTICS OF ELECTRON FLOWS FORMED BY THE ELECTRON-OPTICAL SYSTEM WITH A MULTI-TIP FIELD EMITTER

E. P. Taradaev ✉, **G. G. Sominskii**, **S. P. Taradaev**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ evgeny_tar@hotmail.com

Abstract. The article presents the results of studies of the characteristics of electron flows generated by an electron-optical system with a multi-tip field emitter. Information has been obtained on important beam parameters: the beam current, electron velocity spectrum, pitch factor. The spread in transverse velocity did not exceed 50 % in the studied modes. The shape of the spectra did not depend on the magnitude of the magnetic field and did only weakly on the current in the beam.

Keywords: field emission, multi-tip field emitter, electron flow, velocity spread

Funding: The reported study was funded by Russian Science Foundation (Grant No. 23-29-00224).

For citation: Taradaev E. P., Sominskii G. G., Taradaev S. P., Current and speed characteristics of electron flows formed by the electron-optical system with a multi-tip field emitter, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 17 (1) (2024) 64–70. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17107>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Одно из практически значимых направлений развития современной СВЧ-электроники связано с созданием и совершенствованием субтерагерцовых электронно-пучковых источников излучения (см., например, статьи [1 – 3]). Авторами настоящей работы исследуются возможности использования полевых эмиттеров для формирования электронных потоков, кольцевых в сечении, необходимых для миниатюрных, но высоковольтных устройств этого диапазона частот. Полевые эмиттеры, разрабатываемые в настоящее время [4 – 9], имеют очевидные преимущества перед термокатодами, так как не требуют накала и обеспечивают практически безынерционное включение и выключение источника электронов.

Однако разработка электронно-оптических систем (ЭОС) с полевыми эмиттерами затруднена, ввиду недостатка информации о характеристиках электронных потоков, которые они формируют. Ранее авторами проводилось экспериментальное исследование пространственно-временных и скоростных характеристик электронных потоков в ЭОС с полевыми эмиттерами, имеющих конфигурацию электродов, типичную для устройств гиротронного типа [10]. Однако измерения были выполнены лишь при малых магнитных полях, не превышающих 0,1 Тл.

В настоящей работе исследованы характеристики электронных потоков, создаваемых в ЭОС с многоострийными полевыми эмиттерами в существенно больших магнитных полях (ориентировочно до 2,5 Тл), типичных для гиротронных устройств субтерагерцового диапазона.

Методика измерений и аппаратура

Для измерения характеристик электронных потоков использовалась ЭОС, схематическое изображение сечения которой показано на рис. 1.

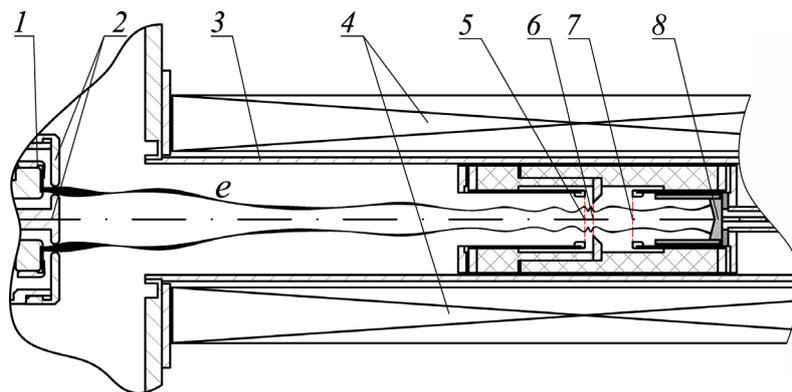


Рис. 1. Схематическое изображение электронно-оптической системы (ЭОС) с анализатором тормозящего поля (установлен в центре соленоида):

1 – катодная система; 2 – управляющий электрод с кольцевой диафрагмой; 3 – канал транспортировки электронного пучка (e); 4 – соленоид; 5, 7 – экранирующие сетки; 6 – тормозящая сетка; 8 – коллектор электронов

Размеры основных деталей ЭОС и анализатора приведены в таблице. Для компрессии и удержания электронного потока с помощью соленоида формировались импульсы магнитного поля длительностью 10 мс. Для обеспечения полевой эмиссии на катод подавался импульс отрицательного (относительно заземленного управляющего электрода) напряжения U амплитудой до 15 кВ. Длительность импульсов варьировалась от 10 до 100 мкс.

Таблица

Основные геометрические параметры электронно-оптической системы (см. рис. 1)

Элемент электронно-оптической системы	Параметр	Размер, мм
Катодная система 1	Расстояние между управляющим электродом 2 и катодом 1	2,00
	Ширина диафрагмы в управляющем электроде 2	2,00
	Средний диаметр полевого эмиттера	14,0
	Ширина полевого эмиттера	0,65
	Высота острий полевого эмиттера и расстояние между ними	0,03
Соленоид 4	Диаметр обмотки:	
	внешний	42
	внутренний	30
	Длина соленоида 4	200
Анализатор скоростей электронов	Расстояние между экранирующей (5) и тормозящей (6) сетками	2

Прикладывалось магнитное поле, возрастающее от минимального B_c на катоде до максимального B_m в центре соленоида. Максимальное значение индукций магнитного поля B_m варьировалась от 0,1 до 2,5 Тл. Коэффициент перемагничивания $k = B_m/B_c$ можно было регулировать путем перемещения соленоида вдоль оси. Экспериментально измерялись ток I электронов в пучке и продольная составляющая скорости электронов V_{\parallel} (направлена вдоль силовых линий магнитного поля); тогда как поперечная составляющая скорости V_{\perp} (направлена перпендикулярно силовым линиям) рассчитывалась по ранее разработанной методике [10].

Скорости электронов определяли методом задерживающего поля с помощью анализатора (см. рис. 1 и таблицу). Анализатор помещался в области магнитного поля, однородного вдоль оси, вблизи центральной плоскости сечения соленоида. Измерялись кривые задержки (зависимости тока I электронов, прошедших на коллектор 8 анализатора, от величины задерживающего, отрицательного (относительно земли) напряжения U_z , прикладываемого на сетку 6. Поскольку электроны, обладающие скоростью $V_{\parallel} < (2eU_z/m_e)^{1/2}$, не попадают на коллектор 8, полученная кривая задержки $I(U_z)$ перестраивалась в координатах $I(V_{\parallel})$.

Спектр продольных скоростей электронов V_{\parallel} получали дифференцированием кривой $I(V_{\parallel})$. Спектр поперечных скоростей V_{\perp} определяли с учетом информации о полной энергии eU электронов в пучке и полученных данных о распределении скоростей электронов в продольном направлении.

Перед проведением измерений катод тренировали с отбором тока до 20 – 25 мА в течение времени продолжительностью до десяти часов. При этом стабилизировалась работа системы формирования электронного потока.



Результаты измерений и их обсуждение

Во всем исследованном диапазоне значений токов пучка источник электронов стабильно работал в условиях технического вакуума (давление составляло примерно 10^{-7} Торр). После проведения тренировки изменение тока в пучке в единичном импульсе не превышало 1 %.

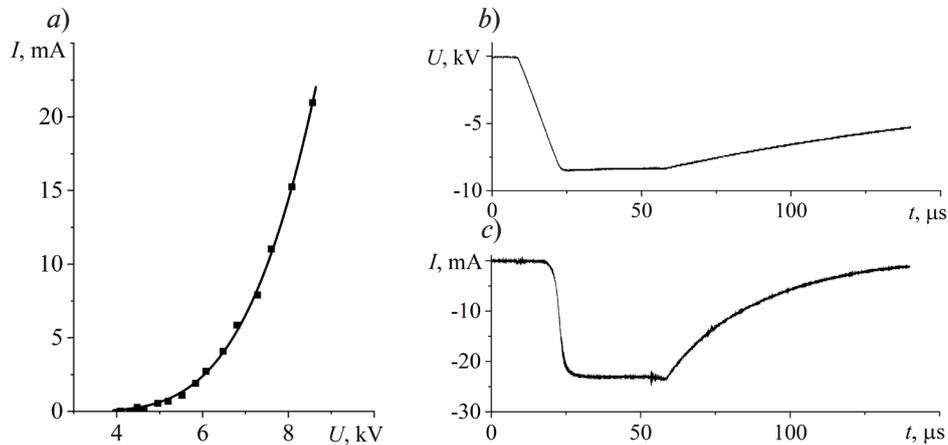


Рис. 2. Результаты измерений характеристик ЭОС: *a* – вольтамперная характеристика; *b*, *c* – осциллограммы напряжения на катоде и тока коллектора анализатора, соответственно

На рис. 2 показаны вольтамперная характеристика исследованной ЭОС, а также осциллограммы импульсов напряжения и тока электронов на коллектор анализатора. В исследованных режимах ЭОС позволяла получать токи в пучке свыше 20 мА.

Основные результаты исследования спектров скорости электронов в их потоке, сформированном электронной пушкой с многоострийным полевым эмиттером, иллюстрируют рис. 3 и 4. На рис. 3 приведены экспериментально измеренные спектры продольной и поперечной скоростей в электронном потоке при разных значениях тока в пучке. На рис. 4 показана трансформация спектров при изменении коэффициента перемagnичивания и величины B_m максимального магнитного поля при фиксированном токе в пучке.

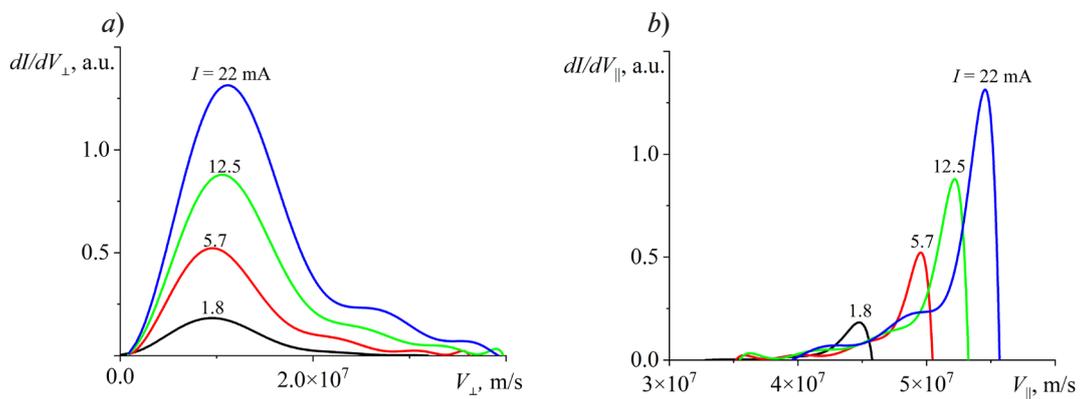


Рис. 3. Спектры поперечной (*a*) и продольной (*b*) скоростей электронов в электронном пучке в ЭОС при его разных токах; максимальное значение индукции магнитного поля $B_m = 2,5$ Тл, коэффициент перемagnичивания $k = 13$

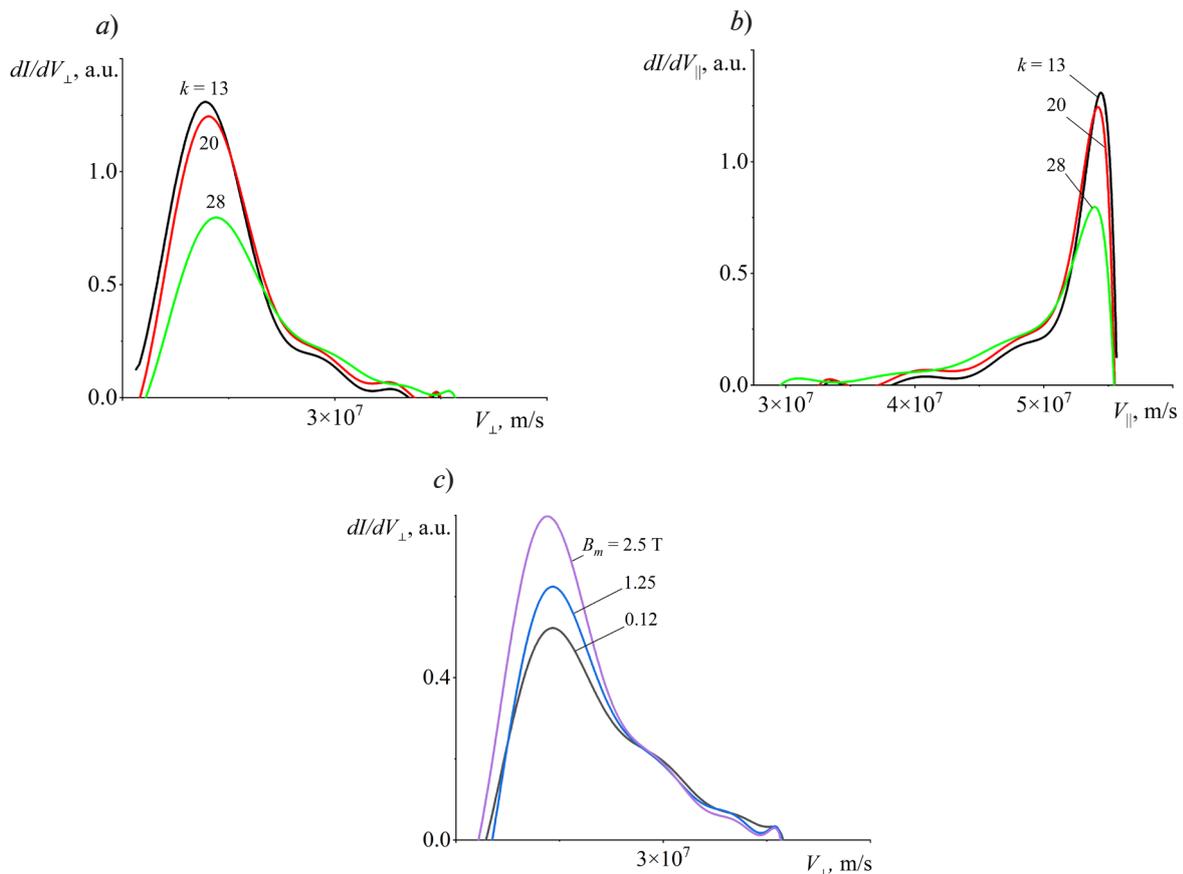


Рис. 4. Спектры поперечной (a, c) и продольной (b) скоростей электронов в электронном пучке в ЭОС при разных значениях коэффициента перемагничивания k (a, b) и максимального магнитного поля B_m (c). Ток в электронном пучке $I = 22$ мА

Для всего электронного потока в целом, среднеквадратичный разброс электронов по поперечной скорости достигал примерно 50%. Полученные данные свидетельствуют, что форма распределения поперечных скоростей практически неизменна при варьировании тока пучка в широких пределах (от 0,1 до 25 мА). При этом усредненный по всему электронному потоку питч-фактор возрос с 0,26 до 0,30 с увеличением тока.

Изменение магнитного поля на катоде при фиксированном коэффициенте перемагничивания практически не влияет на разброс электронов по скорости. Увеличение коэффициента перемагничивания с 13 до 28 при неизменных напряжении U и магнитном поле B_m ведет к снижению тока в пучке. При этом усредненный питч-фактор заметно увеличивается с 0,24 до 0,38.

Заключение

Отметим главные результаты работы. Нами получены данные о значениях токов, а также спектры скоростей электронов, которые имеют место в ЭОС с многоострийным полевым эмиттером. Эти результаты, на наш взгляд, совершенно необходимы разработчикам субтерагерцовых СВЧ-приборов.

В дальнейшем планируются исследования характеристик потоков в электронно-оптических системах с многоострийными и многослойными эмиттерами [9].



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Litvak A. G., Denisov G. G., Glyavin M. Y. Russian gyrotrons: Achievements and trends // IEEE Journal of Microwaves. 2021. Vol. 1. No. 1. Pp. 260–268.
2. Idehara T., Sabchevski S. P., Glyavin M., Mitsudo S. The gyrotrons as promising radiation sources for THz sensing and imaging // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. No. 3. P. 980.
3. Thumm M. K. A., Denisov G. G., Sakamoto K., Tran M. Q. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive // Nuclear Fusion. 2019. Vol. 59. No. 7. P. 073001.
4. Li J., Zhang Y., Ke Y., Li B., Deng S. A cold cathode electron gun using convex carbon nanotube emitter // IEEE Transactions on Electron Devices. 2022. Vol. 69. No. 3. Pp. 1457–1460.
5. Chen Q., Yuan X., Xu X., Zhang Y., Cole M. T., Zu Y., Yan Y. Development of a high-beam-transparency gridded electron gun based on a carbon nanotube cold cathode // IEEE Electron Device Letters. 2020. Vol. 43. No. 4. Pp. 615–618.
6. Whaley D. R., Duggal R., Armstrong C. M., Bellew C. L., Holland C. E., Spindt C. A. 100 W operation of a cold cathode TWT // IEEE Transactions on Electron Devices. 2009. Vol. 56. No. 5. Pp. 896–905.
7. Yuan X., Zhu W., Zhang Y., Xu N., Yan Y., Wu J., Shen Y., Chen J., She J., Deng S. A fully-sealed carbon-nanotube cold-cathode terahertz gyrotron // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. 09 September. P. 32936.
8. Соминский Г. Г., Тумарева Т. А., Тарадаев Е. П., Рукавицына А. А., Степанова А. Н. Многострельные кольцевые полевые эмиттеры с защитными металл-фуллереновыми покрытиями // Журнал технической физики. 2019. Т. 89. № 2. С. 302–305.
9. Соминский Г. Г., Сезонов В. Е., Тарадаев С. П., Вдовичев С. Н. Многослойные полевые эмиттеры, изготовленные из приведенных в контакт нанослоев гафния и платины // Журнал технической физики. 2019. Т. 89. № 1. С. 142–146.
10. Taradaev E. P., Sominskii G. G. Characteristics of an annular electron flow formed by an electron gun with a field emitter // IEEE Transactions on Electron Devices. 2022. Vol. 69. No. 5. Pp. 2675–2679.

REFERENCES

1. Litvak A. G., Denisov G. G., Glyavin M. Y., Russian gyrotrons: Achievements and trends, IEEE J. Microw. 1 (1) (2021) 260–268.
2. Idehara T., Sabchevski S. P., Glyavin M., Mitsudo S., The gyrotrons as promising radiation sources for THz sensing and imaging, Appl. Sci. 10 (3) (2020) 980.
3. Thumm M. K. A., Denisov G. G., Sakamoto K., Tran M. Q., High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive, Nucl. Fusion. 59 (7) (2019) 073001.
4. Li J., Zhang Y., Ke Y., et al., A cold cathode electron gun using convex carbon nanotube emitter, IEEE Trans. Electron Devices, 69 (3) (2022) 1457–1460.
5. Chen Q., Yuan X., Xu X., et al., Development of a high-beam-transparency gridded electron gun based on a carbon nanotube cold cathode, IEEE Electron Device Lett. 43 (4) (2020) 615–618.
6. Whaley D. R., Duggal R., Armstrong C. M., et al., 100 W operation of a cold cathode TWT, IEEE Trans. Electron Devices. 56 (5) (2009) 896–905.
7. Yuan X., Zhu W., Zhang Y., et al., A fully-sealed carbon-nanotube cold-cathode terahertz gyrotron, Sci. Rep. 6 (09 Sept) (2016) 32936.
8. Sominskii G. G., Tumareva T. A., Taradaev E. P., et al., Annular multi-tip field emitters with metal-fullerene protective coatings, Techn. Phys. 64 (2) (2019) 270–273.
9. Sominskii G. G., Sezonov V. E., Taradaev S. P., Vdovichev S. N., Multilayer field emitters made of contacting hafnium and platinum nanolayers, Techn. Phys. 64 (1) (2019) 116–120.
10. Taradaev E. P., Sominskii G. G., Characteristics of an annular electron flow formed by an electron gun with a field emitter, IEEE Trans. Electron Devices. 69 (5) (2022) 2675–2679.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТАРАДАЕВ Евгений Петрович – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

evgeny_tar@hotmail.com

ORCID: 0000-0001-5219-6744

СОМИНСКИЙ Геннадий Гиршевич – доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

sominski@rphf.spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-7945-7238

ТАРАДАЕВ Сергей Петрович – аспирант Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

sergio.rumos@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5548-7379

THE AUTHORS

TARADAEV Evgeny P.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

evgeny_tar@hotmail.com

ORCID: 0000-0001-5219-6744

SOMINSKII Gennadii G.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

sominski@rphf.spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-7945-7238

TARADAEV Sergei P.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

sergio.rumos@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5548-7379

Статья поступила в редакцию 23.11.2023. Одобрена после рецензирования 08.12.2023. Принята 11.12.2023.

Received 23.11.2023. Approved after reviewing 08.12.2023. Accepted 11.12.2023.