

Научная статья

УДК 537.533

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18109>

ФОРМИРОВАНИЕ ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С КОМПОЗИТНЫМ ПОЛЕВЫМ ЭМИТТЕРОМ ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА И ИЗ СМЕСИ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА С ГРАНУЛАМИ АЛМАЗА

Е. П. Тарадаев¹ , Г. Г. Соминский¹, С. П. Тарадаев¹, С. К. Гордеев²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

² ОАО «Центральный научно-исследовательский институт материалов»,
Санкт-Петербург, Россия

 evgeny_tar@hotmail.com

Аннотация. В работе изучены характеристики электронных потоков, формируемых электронно-оптической системой с композитными полевыми катодами, изготовленными из терморасширенного графита или из смеси такого графита с алмазными гранулами. Отличительной особенностью катодов, разработанных в Санкт-Петербургском политехническом университете и АО «ЦНИИМ», является их усовершенствованная геометрия. Были определены максимально достижимые токи эмиссии, а также продольная и поперечная составляющие скорости эмитированных электронов в электронном потоке. Измерения проводились в двух режимах: импульсном и непрерывном. Проведенные эксперименты показали, что катоды данного типа обеспечивают токи эмиссии до 30 мА и устойчиво работают в условиях технического вакуума.

Ключевые слова: полевая эмиссия, композитные катоды, терморасширенный графит, электронно-оптическая система, электронный пучок

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

Для цитирования: Тарадаев Е. П., Соминский Г. Г., Тарадаев С. П., Гордеев С. К. Формирование потока электронов электронно-оптической системой с композитным полевым эмиттером из терморасширенного графита и из смеси терморасширенного графита с гранулами алмаза // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 1. С. 103–110. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18109>

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.18109>

FORMATION OF AN ELECTRON BEAM BY AN ELECTRON-OPTICAL SYSTEM USING A COMPOSITE FIELD EMITTER MADE OF THERMALLY EXPANDED GRAPHITE AND A MIXTURE OF THERMALLY EXPANDED GRAPHITE WITH DIAMOND GRANULES

E. P. Taradaev¹ , **G. G. Sominskii**¹, **S. P. Taradaev**¹, **S. G. Gordeev**²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

² JSC "Central Research Institute for Materials", St. Petersburg, Russia

 evgeny_tar@hotmail.com

Abstract. In the paper, the characteristics of electron flows formed by an electron-optical system with composite field emitters, made from thermally expanded graphite or a mixture of such graphite with diamond granules have been studied. These cathodes were developed at the Saint Petersburg Polytechnic University and the Central Research Institute of Materials. A distinguishing feature of these cathodes is their improved geometry. The maximum achievable emission currents, as well as the longitudinal and transverse components of the velocity of emitted electrons in the electron flow, were determined. The measurements were carried out in pulsed and continuous operations. Experiments showed that these types of cathodes provided emission currents up to 30 mA and operated stably under technical vacuum conditions.

Keywords: field emission, composite cathodes, thermally expanded graphite, electron-optical system, electron beam

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., Gordeev S. G., Formation of an electron beam by an electron-optical system using a composite field emitter made of thermally expanded graphite and a mixture of thermally expanded graphite with diamond granules, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (1) (2025) 103–110. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18109>

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

Введение

В последние годы наблюдается возрастающий интерес к разработке и усовершенствованию гиротронов терагерцового и субтерагерцового диапазонов [1, 2]. Столь высококачественные устройства могут применяться, например, для диагностики объектов в медицине и биологии [3], для определения состава молекулярных газов, выявления взрывчатых и других запрещенных веществ, а также во многих других приложениях [4].

Терагерцовые и субтерагерцовые гиротроны имеют малые размеры, в связи с чем трудно обеспечить их работу с помощью традиционных термокатодов, так как такие катоды требуют накала. Кроме того, термокатоды не могут обеспечивать безынерционное включение и выключение приборов, необходимое во многих случаях. По указанным причинам представляется заманчивой замена термокатодов холодными полевыми эмиттерами, которые не требуют накала и практически безынерционны [5, 6].

В лаборатории сильноточной и СВЧ-электроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого были ранее разработаны и исследованы многоострийные кремниевые полевые эмиттеры с двухслойным металл-фуллереновым защитным покрытием [7], а также многослойные эмиттеры, состоящие из большого числа пар слоев материалов с разной работой выхода, приведенных в контакт [8].

Эмиттеры указанного типа применимы для формирования кольцевых в сечении и ленточных электронных потоков (см., например, статью [9]). Они способны создавать токи эмиссии, необходимые для ряда приложений [10]. Однако, несмотря на их очевидные достоинства, такие эмиттеры отличаются высокой сложностью изготовления, что затрудняет их применение.

Позднее авторы настоящей работы совместно с сотрудниками АО «Центральный научно-исследовательский институт материалов имени Д. И. Менделеева» (ЦНИИМ) разработали композитные полевые эмиттеры на основе терморасширенного графита (TEG) и его смеси с алмазными гранулами (TEG+gD) [11]. Эти полевые эмиттеры отличались более простой технологией изготовления. Благодаря своей пористой структуре, композитные катоды обладали развитой эмиссионной поверхностью с большим количеством выступов, усиливающих электрическое поле [12, 13].

Дальнейшее улучшение эмиттеров TEG состояло в усовершенствовании их геометрии.

Цель данного исследования – изучить характеристики электронных потоков, формируемых электронно-оптической системой с катодами, изготовленными из TEG и его смеси с алмазными гранулами (TEG+gD), а также оценить влияние геометрических усовершенствований катодов на их эмиссионные свойства.

Методика измерений и аппаратура

В работе были исследованы композитные катоды, состоящие только из частиц терморасширенного графита (TEG), а также катоды, состоящие из смеси TEG с гранулами алмаза (TEG+gD). Характерный размер гранул алмаза составлял 20 мкм; содержание этих гранул в композите – 30 % по объему.

Для создания композитных катодов частицы TEG или частицы TEG+gD перемешивали для создания однородной по объему смеси, а затем под высоким давлением (40 – 200 МПа) спрессовывались в специальных пресс-формах для создания катодов заданных размеров.

Формировались катоды с выступом треугольной формы в основании эмиттирующей структуры, которые отличались повышенной прочностью, по сравнению с исследованными ранее ленточными и кольцевыми эмиттерами [11]. На рис. 1 приведено изображение поперечного сечения катода такого типа с указанием основных геометрических размеров.

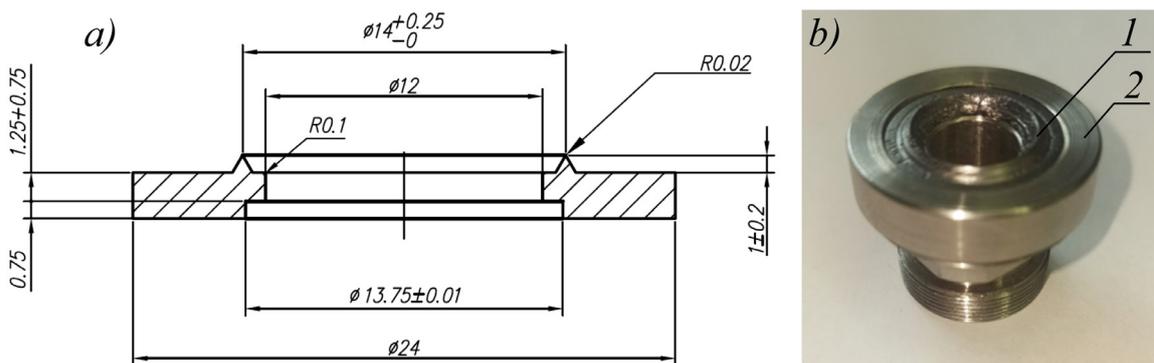


Рис. 1. Чертеж катода новой геометрии (а) и фотография этого катода (1), установленного в оправку (2) (b)

На рис. 2 показана электронно-оптическая система (ЭОС) с композитным эмиттером, использованная для формирования и исследования электронного потока. Система включала электронную пушку (1), канал транспортировки электронного потока (2) и соленоид (3). На рисунке также показан анализатор, который вставлен в систему.

Для формирования электронного потока на катод подавалось отрицательное (относительно заземленного управляющего электрода) напряжение U . Электроны, прошедшие через кольцевую диафрагму в управляющем электроде пушки, попадали в канал

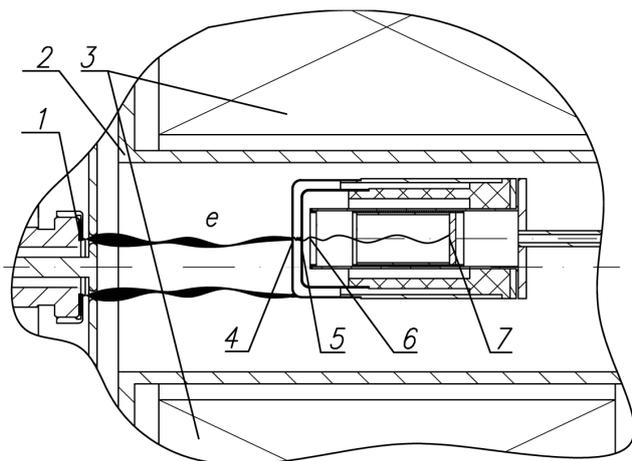


Рис. 2. Схематическое изображение электронно-оптической системы с установленным анализатором (4–7):

1 – электронная пушка; 2 – канал транспортировки электронного пучка (e – электронный поток); 3 – соленоид; 4 – входная диафрагма; 5, 6 – тормозящая и экранирующая сетки, соответственно; 7 – коллектор анализатора

Чтобы измерить распределение по скоростям электронов, эмитированных катодом, в потоке, сформированном ЭОС, был использован анализатор с подвижной входной диафрагмой, расположенный в канале транспортировки (см. рис. 2). Анализатор допускал перемещение в радиальном и азимутальном направлениях. Диаметр входного отверстия диафрагмы составлял 300 мкм. Распределение электронов по скоростям измерялось методом тормозящего поля [9].

Измерения проводили в условиях технического вакуума при давлениях порядка 10^{-7} Торр. Измерялись следующие величины: токи эмиссии катода (I), управляющего электрода и коллектора, а также продольная (V_{\parallel}) и поперечная (V_{\perp}) (относительно силовых линий магнитного поля) составляющие скорости эмитированных электронов.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 приведены типичные измеренные вольтамперные характеристики $I(U)$ и изменения тока эмиссии катодов во время их работы.

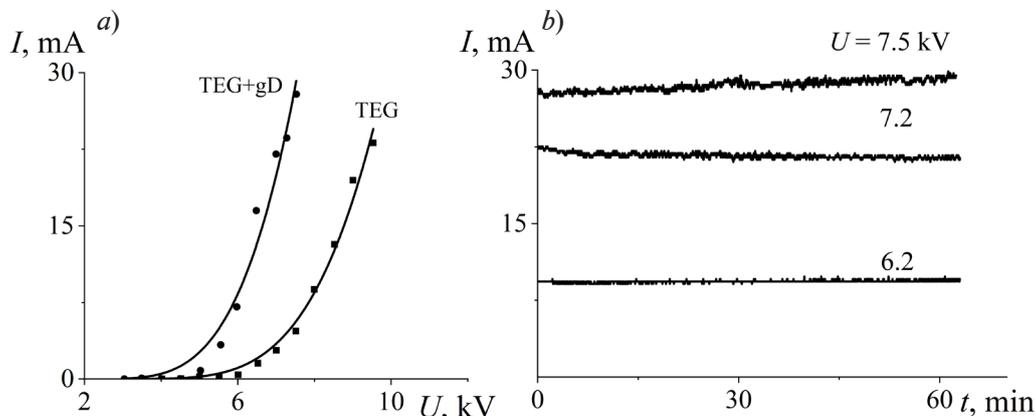


Рис. 3. Типичные экспериментальные данные измерений: a – вольтамперные характеристики композитных полевых эмиттеров на основе TEG и TEG+gD, b – зависимости от времени тока эмиссии катода TEG+gD при разных значениях отрицательного напряжения U

транспортировки, который также служил коллектором электронов.

Измерения проводились в двух режимах: импульсном, с длительностью импульса 1 мкс и частотой следования 50 – 100 Гц, а также в непрерывном. Чтобы избежать сильного нагрева электродов в непрерывном режиме, ток с катода ограничивали значениями 5 – 10 мА. В импульсном режиме исследовалась работа катодов при больших токах.

Электронный пучок распространялся в магнитном поле, создаваемом соленоидом. Соленоид длиной 200 мм имел внутренний и внешний диаметры 120 и 450 мм, соответственно. Индукция магнитного поля увеличивалась от минимального значения B_c на катоде до максимального B_{\max} в центре соленоида. Величина B_{\max} не превышала 0,1 Тл. Коэффициент перемagnичивания $k = B_{\max} / B_c$ можно было регулировать путем изменения положения соленоида относительно катода; значение k во всех экспериментах не превышало 8.

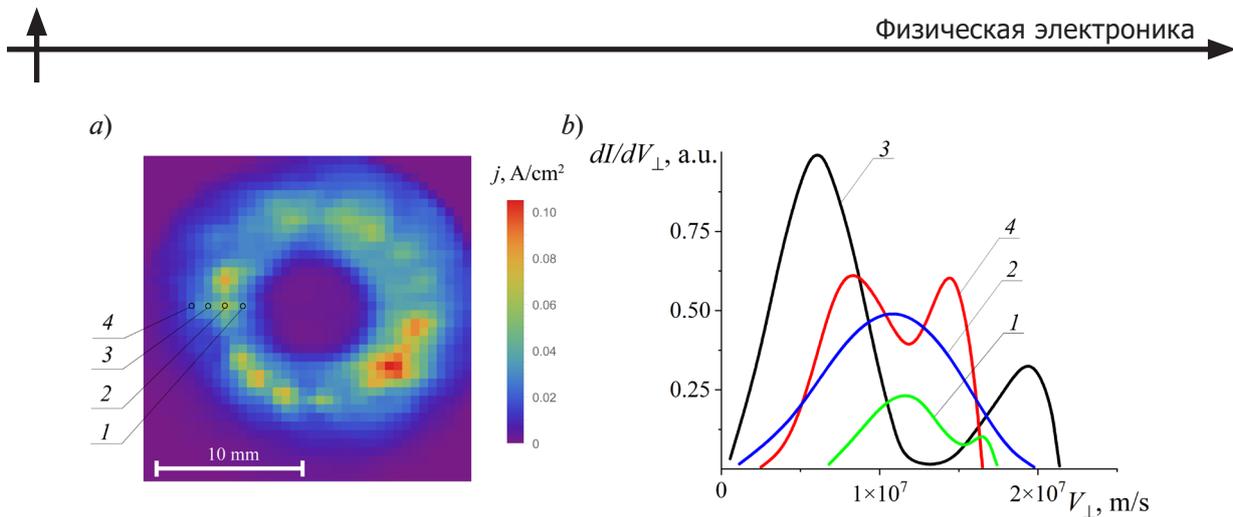


Рис. 4. Типичные экспериментальные результаты: *a* – распределение плотности тока в поперечном сечении электронного пучка, *b* – спектры поперечных компонент скорости эмитированных электронов, измеренные в разных участках по сечению стенки пучка

На рис. 4,*a* показано распределение электронного потока в его поперечном сечении, зарегистрированное при перемещении анализатора. На рис. 4,*b* представлены спектры поперечных составляющих скорости электронов, измеренные в разных участках по сечению стенки пучка. Анализ полученных данных позволяет заключить, что кольцевые эмиттеры из TEG и TEG+gD могут обеспечивать значения токов эмиссии вплоть до 30 мА с площади 0,04 – 0,05 см² и стабильно эмитируют токи в техническом вакууме в условиях интенсивной ионной бомбардировки. Форма распределения поперечных скоростей оставалась практически неизменной во всем исследованном интервале токов электронного потока.

Для всего электронного пучка разброс по поперечным составляющим скорости, определенный как относительное среднее квадратичное отклонение от средней поперечной скорости электронов, не превышал примерно 50 %.

Катоды стабильно давали эмиссию в условиях технического вакуума при давлении 10^{-7} Торр на протяжении всего процесса измерений. Однако к негативной особенности работы катодов можно отнести неоднородность формируемого потока в азимутальном и радиальном направлениях.

Заключение

Представленные в данной статье результаты экспериментального исследования позволяют заключить, что изученные в работе, геометрически модифицированные композитные катоды как на основе терморасширенного графита, так и смеси такого графита с гранулами алмаза имеют многообещающие перспективы для применения в коротковолновых гиротронах терагерцового и субтерагерцового диапазонов. Эти катоды с треугольным выступом на поверхности достаточно прочны и просты в изготовлении, что удешевляет их производство.

В дальнейшем планируется продолжать исследования электронно-оптических систем с композитными катодами, уделяя основное внимание поиску путей улучшения их токовых характеристик и повышению однородности формируемых ими электронных потоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glyavin M., Sabchevski S., Idehara T., Mitsudo S. Gyrotron-based technological systems for material processing – Current status and prospects // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2020. Vol. 41. No. 8. Pp. 1022–1037.
2. Glyavin M. Y., Chirkov A. V., Denisov G. G., et al. Experimental tests of a 263 GHz gyrotron for spectroscopic applications and diagnostics of various media // Review of Scientific Instruments. 2015. Vol. 86. No. 5. P. 054705.

3. Idehara T., Glyavin M., Kuleshov A., Sabchevski S., Manuilov V., Zaslavsky V., Zotova I., Sedov A. A novel THz-band double-beam gyrotron for high-field DNP-NMR spectroscopy // *Review of Scientific Instruments*. 2017. Vol. 88. No. 9. P. 094708.
4. Запевалов В. Е., Зуев А. С., Куфтин А. Н. Многоствольные гиротроны // *Известия вузов. Радиофизика*. 2020. Т. 63. № 2. С. 105–114.
5. 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.
6. Glyavin M., Manuilov V., Taradaev E., Sominskii G., Fokin A., Sedov A. Design of a pulsed 0.5 THz gyrotron and preliminary test of its electron gun with field emitter // *Infrared Physics & Technology*. 2020. Vol. 111. December. P. 103480.
7. Соминский Г. Г., Тумарева Т. А., Тарадаев Е. П., Мишин М. В., Степанова А. Н. Много-острийные полупроводниковые полевые эмиттеры с двухслойными защитными покрытиями нового типа // *Журнал технической физики*. 2015. Т. 85. № 1. С. 138–141.
8. 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.
9. Taradaev E., Sominskii 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.
10. Шестеркин В. И. Эмиссионно-эксплуатационные характеристики различных типов автоэмиссионных катодов // *Радиотехника и электроника*. 2020. Т. 65. № 1. С. 3–30.
11. Gordeev S., Sezonov V., Sominskii G., Taradaev E., Taradaev S. Electron flows formed by electron-optical systems using composite field emitters made of thermally expanded graphite and diamond-graphite mixtures // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2023. Vol. 70. No. 10. Pp. 5348–5352.
12. Egorov N., Sheshin E. Carbon-based field-emission cathodes (Chapter) // Egorov N., Sheshin E. *Field emission electronics* (Springer Series in Advanced Microelectronics. Vol. 60). Cham, Switzerland: Springer Nature, 2017. Pp. 295–367.
13. Яковлев А. В., Забудьков С. Л., Финаенов А. И., Яковлева Е. В. Терморасширенный графит: синтез, свойства и перспективы применения // *Журнал прикладной химии*. 2006. Т. 79. № 11. С. 1761–1771.

REFERENCES

1. Glyavin M., Sabchevski S., Idehara T., Mitsudo S., Gyrotron-based technological systems for material processing – Current status and prospects, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*. 41 (8) (2020) 1022–1037.
2. Glyavin M. Y., Chirkov A. V., Denisov G. G., et al., Experimental tests of a 263 GHz gyrotron for spectroscopic applications and diagnostics of various media, *Rev. Sci. Instrum.* 86 (5) (2015) 054705.
3. Idehara T., Glyavin M., Kuleshov A., et al., A novel THz-band double-beam gyrotron for high-field DNP-NMR spectroscopy, *Rev. Sci. Instrum.* 88 (9) (2017) 094708.
4. Zapevalov V. E., Zuev A. S., Kuftin A. N., Multibarrel gyrotrons, *Radiophys. Quantum Electron.* 63 (2) (2020) 97–105.
5. Yuan X., Zhu W., Zhang Y., et al., A fully-sealed carbon-nanotube cold-cathode terahertz gyrotron, *Sci. Rep.* 6 (09 Sept) (2016) 32936.
6. Glyavin M., Manuilov V., Taradaev E., et al., Design of a pulsed 0.5 THz gyrotron and preliminary test of its electron gun with field emitter, *Infrared Phys. Technol.* 111 (Dec) (2020) 103480.
7. Sominskii G. G., Tumareva T. A., Taradaev E. P., et al., Multitip semiconductor field emitters with new-type bilayer protecting coatings, *Tech. Phys.* 60 (1) (2015) 133–136.
8. Sominskii G. G., Sezonov V. E., Taradaev S. P., Vdovichev S. N., Multilayer field emitters made of contacting hafnium and platinum nanolayers, *Tech. Phys.* 64 (1) (2019) 116–120.
9. Taradaev E., Sominskii G., Characteristics of an annular electron flow formed by an electron gun with a field emitter, *IEEE Tran. Electron Dev.* 69 (5) (2022) 2675–2679.
10. Shesterkin V. I., Operating emission characteristics of various types of field-emission cathodes, *J. Commun. Technol. Electron.* 65 (1) (2020) 1–26.



11. Gordeev S., Sezonov V., Sominskii G., et al., Electron flows formed by electron-optical systems using composite field emitters made of thermally expanded graphite and diamond-graphite mixtures, IEEE Trans. Electron Dev. 70 (10) (2023) 5348–5352.
12. Egorov N., Sheshin E., Carbon-based field-emission cathodes (Chapter), In book: Egorov N., Sheshin E. Field emission electronics (Springer Ser. in Advanced Microelectronics. Vol. 60), Springer Nature, Cham, Switzerland (2017) 295–367.
13. Yakovlev A. V., Finaenov A. I., Zabd'kov S. L., Yakovleva E. V., Thermally expanded graphite: Synthesis, properties, and prospects for use, Russ. J. Appl. Chem. 79 (11) (2006) 1741–1751.

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
somenski@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

ГОРДЕЕВ Сергей Константинович – доктор технических наук, начальник лаборатории наноматериалов и карбидных композитов ОАО «Центральный научно-исследовательский институт материалов», Санкт-Петербург, Россия.

191014, Россия, г. Санкт-Петербург, Парадная ул., 8
gordeevsk@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5790-7197

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
somenski@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

GORDEEV Sergey G.

JSC "Central Reseach Institute for Materials"
8 Paradnaja St., St. Petersburg, 191014, Russia
gordeevsk@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5790-7197

*Статья поступила в редакцию 31.10.2024. Одобрена после рецензирования 11.11.2024.
Принята 11.11.2024.
Received 31.10.2024. Approved after reviewing 11.11.2024. Accepted 11.11.2024.*