

DOI: 10.18721/JPM.11407

УДК 537.533.2

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
С ПОЛЕВЫМ ЭМИТТЕРОМ ДЛЯ КОРОТКОВОЛНОВОГО
ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ГИРОТРОНА****Е.П. Тарадаев, Г.Г. Соминский**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Изучена возможность работы многоострийных кремниевых эмиттеров с защитными металлфуллереновыми покрытиями в трехэлектродной электронно-оптической системе (ЭОС) с магнитным удержанием. Данная ЭОС предназначена для формирования электронного потока в коротковолновом диагностическом гиротроне. Были проведены трехмерные расчеты с использованием программного пакета Comsol. Показана возможность получения токов свыше 20 – 30 мА, необходимых для работы диагностического гиротрона. В ходе расчетов было определено соотношение токов, попадающих на управляющий электрод и на коллектор. В отсутствие магнитного поля ток управляющего электрода составлял 0,5% от тока катода. При значениях индукции магнитного поля в области между катодом и управляющим электродом свыше 0,07 Тл, ток управляющего электрода отсутствовал.

Ключевые слова: многоострийный полевой эмиттер, электронная пушка, магнитное сопровождение, электронный пучок

Ссылка при цитировании: Тарадаев Е.П., Соминский Г.Г. Моделирование электронно-оптической системы с полевым эмиттером для коротковолнового диагностического гиротрона // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 4. С. 77–84. DOI: 10.18721/JPM.11407

**SIMULATION OF THE ELECTRON-OPTICAL SYSTEM WITH A FIELD
EMITTER FOR A SHORT-WAVE DIAGNOSTIC GYROTRON****E.P. Taradaev, G.G. Sominskii**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

The operational capability of multi-tip silicon emitters with protective metal fullerene coatings in a three-electrode electron-optical system (EOS) with magnetic confinement has been studied. This EOS is intended for electron-stream generation in the diagnostic shortwave gyrotron. Three-dimensional calculations were performed using the Comsol software package. The feasibility of attainment of currents beyond 20 – 30 mA required for the diagnostic gyatron operation was shown. In the course of the calculations, the ratio of the currents falling on the control electrode and on the collector was determined. In the absence of a magnetic field, the control electrode's current was 0.5% of the cathode's one. No control electrode's current existed when

the values of the magnetic field induction in the region between the cathode and the control electrode were beyond 0.07 T.

Keywords: multi-tip field emitter, electron gun, magnetic tracking, electron beam

Citation: E.P. Taradaev, G.G. Sominskii, Simulation of the electron-optical system with a field emitter for a short-wave diagnostic gyrotron, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 11 (4) (2018) 77–84. DOI: 10.18721/JPM.11407

Введение

Все больший и больший интерес привлекают к себе миниатюрные электронные СВЧ-устройства коротковолнового (миллиметрового и субмиллиметрового) диапазона длин волн, находящие применение в самых разных областях, в частности в физике, медицине и биологии. Например, эти устройства применяют для диагностики плотной плазмы, спектроскопии ядерного магнитного резонанса, динамической поляризации ядер. В системах формирования электронных потоков в вакуумных СВЧ-приборах обычно используют термокатоды. Однако применение накаливаемых катодов в устройствах малого размера связано с рядом серьезных проблем при их эксплуатации.

При нагреве катода меняются размеры деталей прибора, а это приводит к нежелательному изменению его выходных характеристик. Кроме того, в некоторых приложениях важно обеспечивать максимальную безынерционность запуска и выключения СВЧ-приборов, что затруднено при использовании термокатодов. По указанным причинам перспективной представляется замена термокатодов полевыми эмиттерами, которые не требуют накала и практически безынерционны. Несмотря на указанные очевидные преимущества полевых эмиттеров, они практически не используются в СВЧ-приборах. Применению холодных эмиттеров в высоковольтных, но миниатюрных устройствах, работающих в условиях технического вакуума, препятствуют их малая долговечность в условиях интенсивной ионной бомбардировки, а также трудности в достижении с их помощью требуемых больших токов эмиссии. Для обеспечения работы даже сравнительно маломощных (десятки ватт) диагностических гиротронов необходимы токи эмис-

сии свыше 20 – 30 мА при плотности тока порядка или более 100 мА /см² [1].

Делаются попытки применения в высоковольтных приборах «распределенных» полевых эмиттеров [2 – 6], способных обеспечивать необходимые токи полевой эмиссии. Примером одной из самых успешных попыток запустить СВЧ-приборы может служить опыт использования катодов Спиндта [6 – 8]. Однако демонстрационные эксперименты, выполненные с такими катодами, были немногочисленными, кратковременными и проводились либо в низковольтных (менее 4 кВ) лампах бегущей волны сантиметрового диапазона (достаточно длинноволновых) [6, 7], либо в чрезвычайно высоковольтных (более 40 кВ) источниках рентгеновского излучения [8]. Иными словами, опыты проведены с приборами, где либо мал коэффициент распыления ионами катода, либо мало сечение ионизации молекул остаточного газа и мал, в связи с этим, поток ионов на катод. Еще одним примером применения полевых эмиттеров может служить попытка использовать эмиттер на основе углеродных нанотрубок в магнетронно-инжекторной пушке гиротрона [9]. Авторы указанной работы опробовали функционирование такого катода в гиротроне на частоте 0,2 ТГц. Однако они не смогли достичь на таком приборе выходной мощности, превышающей хотя бы 0,5 Вт. Столь низкое значение, скорее всего, было связано с плохим согласованием частот гиротрона и конфигурации эмиттера с аномально большой поверхностью и неоднородным покрытием последнего.

Совсем недавно лабораторией сильноточной и СВЧ-электроники СПбПУ (Санкт-Петербург), совместно с коллегами из Института прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород), была разработана концепция создания триодной электронно-оптической системы (ЭОС) с

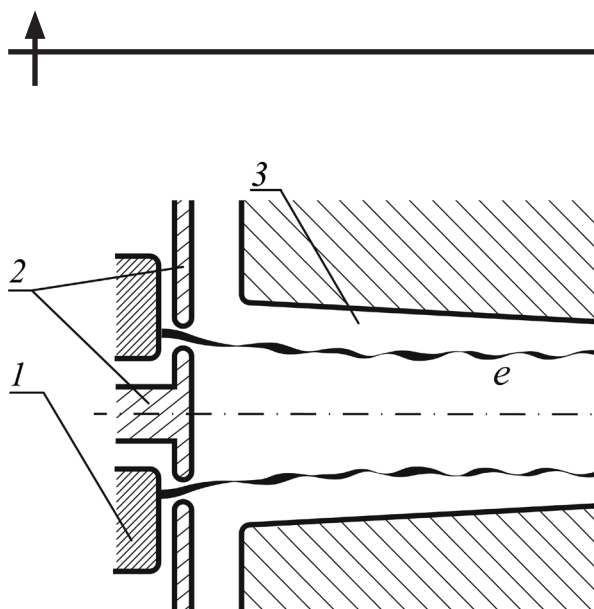


Рис. 1. Схематическое изображение сечения проектируемой электронной пушки с кольцевым полевым эмиттером [10]: 1 – катодная система с полевым эмиттером на торце, 2 – управляющий электрод с кольцевой диафрагмой, 3 – канал транспортировки электронного пучка (e)

полевым эмиттером [10] для диагностического гиротрона. Проектируемый гиротрон работает в миллиметровом диапазоне длин волн при рабочих напряжениях порядка 15 – 20 кВ. На рис. 1 приведено схематическое изображение ЭОС, включающей катодную систему 1 с полевым эмиттером на торце, управляющий электрод 2 с кольцевой диафрагмой и канал транспортировки электронного пучка 3. В качестве источника электронов в этой ЭОС предложено использовать разработанные и исследованные [11 – 13] многоострийные эмиттеры из кремния [14] со специальным двухслойным металлфуллереновым покрытием.

В работе [12] изучены многоострийные кремниевые катоды с двухслойным металлфуллереновым покрытием, имеющие площадь эмитирующей поверхности около 0,2 – 0,3 см². Нанесение слоя молибдена толщиной 5 – 15 нм на поверхность кремниевого эмиттера позволяло повысить проводимость и прочность острий. Для защиты эмиттера от разрушающего действия ионной бомбардировки, поверх металлического слоя наносилось 2 – 3 монослоя молекул фуллерена C₆₀ [15].

Чтобы свести к допустимому минимуму разогрев коллектора, вызванный ин-

тенсивной электронной бомбардировкой его поверхности, измерения эмиссионных характеристик в непрерывном режиме выполнялись при токах с катода, не превышающих 1,0 – 1,5 мА. Измерения при больших токах проводились только в импульсном режиме (1 – 2 мкс, 50 – 500 Гц). В том же режиме были получены чрезвычайно большие (до 100 – 110 мА) полные токи эмиссии при плотностях тока эмиссии свыше 0,4 А/см² [16]. Между тем, для многих приложений желательно обеспечивать получение больших токов именно в непрерывном режиме.

Такое требование можно удовлетворить, если свести к допустимому минимуму разогрев под действием электронной бомбардировки электродов ЭОС. Перегрева крупногабаритного коллектора ЭОС можно избежать, если использовать его принудительное водяное охлаждение. В случае же миниатюрного управляющего электрода, охлаждение водой оказывается трудной задачей. Поэтому чрезвычайно важно наладить максимально полное прохождение пучка электронов сквозь диафрагму этого электрода.

В настоящей работе рассмотрены возможности решения этой проблемы в системе формирования электронного пучка при введении в прибор удерживающего магнитного поля, которое не позволит электронам осесть на управляющий электрод.

Методика расчетов

Расчет выполнен для триодной системы (см. рис. 1). Основные расчетные параметры и их значения представлены в таблице.

Магнитное поле создавалось с помощью соленоида, ось которого совпадает с осью вращения ЭОС. Расчеты выполнены в широком интервале значений магнитного поля (от 0 до 0,3 Тл). Магнитное поле соленоида в области формирования и транспортировки электронного пучка рассчитывалось стандартными методами в программе Comsol с учетом его фиксированных размеров (см. таблицу). Величина магнитного поля регулировалась изменением тока I_s обмотки соленоида. Распределение магнитного поля вдоль оси прибора при разных

Таблица

Значения параметров моделирования

Объект	Параметр	Значение
Триодная система	Расстояние между управляющим электродом и катодом	2 мм
	Ширина диафрагмы в управляющем электроде	2 мм
Катод	Средний диаметр	14 мм
	Ширина эмитирующего пояса	0,65 мм
	Высота острия, расстояние между ними	30 мкм
	Радиус вершины острия	10 – 40 нм
	Работа выхода острий	5,3 эВ
	Работа выхода покрытия	5,3 эВ
Соленоид	Диаметр обмотки: внешний внутренний	480 мм 130 мм
	Толщина обмотки соленоида	190 мм
	Диаметр провода обмотки	2 мм

токах I_s в обмотке соленоида показано на рис. 2. Отсчет координаты z на рис. 2 велся от катода.

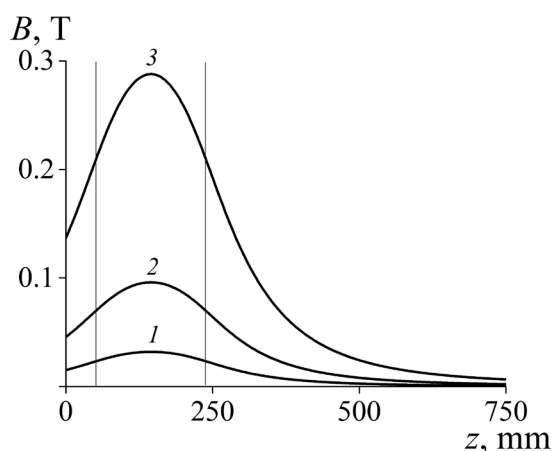


Рис. 2. Распределение магнитного поля вдоль оси прибора при разных токах I_s в обмотке соленоида. Значения I_s , А: 1 (кривая 1), 3 (2), 9 (3). Вертикальными линиями указаны границы соленоида

В расчетах были выбраны оптимальные размеры катода и морфология его поверхности. Расчетные параметры кольцевого катода также представлены в таблице. Высота острий h и расстояние L между ними принимались равными. Радиус вершины каждого острия R (с учетом толщины покрытия) варьировался от 10 до 40 нм. В расчетах работа выхода острий $e\phi$ была принята равной работе выхода фуллеренового покрытия. На катод подавалось отрицательное напряжение $1 \leq U \leq 20$ кВ относительно заземленных управляющего электрода и коллектора.

Токи с катода, токи на управляющий электрод I_g и на коллектор I_c рассчитывались по методике, использованной в работе [18]. Ток коллектора определялся путем вычитания значения тока управляющего электрода из значения полного тока эмиттера I_{Σ} . Все расчеты были выполнены в трехмерной модели с использованием пакета программ Comsol Multiphysics.

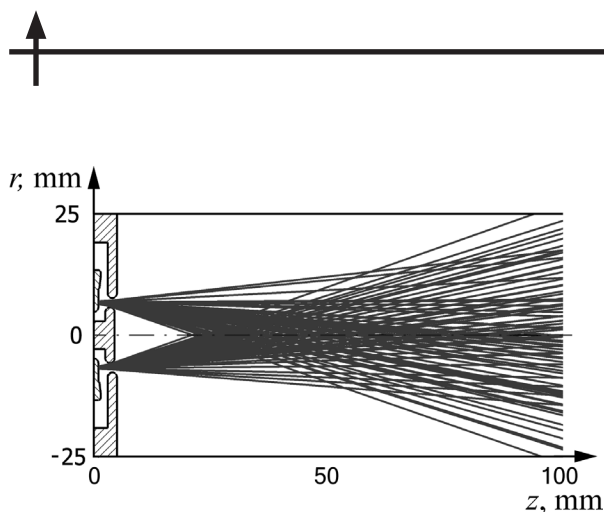


Рис. 3. Типичные траектории движения электронов в ЭОС в отсутствие магнитного поля. Расчет приведен для катода с $R = 15$ нм, при напряжении $U = 15$ кВ

Результаты расчетов и их обсуждение

Важным параметром, определяющим возможности использования ЭОС, является коэффициент прохождения электронов k сквозь управляющий электрод, численно равный отношению тока электронов, прошедших сквозь диафрагму управляющего электрода (тока на коллектор), к величине тока электронов, покинувших эмиттер.

В отсутствие магнитного поля на управляющий электрод ЭОС попадала лишь малая часть (0,5 %) эмитированных электронов. Большая часть электронов (99,5 %), пройдя сквозь диафрагму, достигала коллектора. На рис. 3 показаны типичные траектории электронов в триодной ЭОС с многоострийным полевым эмиттером, рассчитанные в отсутствие магнитного поля,

при фиксированных значениях $R = 15$ нм и $U = 15$ кВ.

Электронный поток начинал оседать на стенках канала транспортировки электронов (коллектора) диаметром 50 мм уже на расстоянии 100 мм от торца катода. На рис. 4 приведены зависимости тока коллектора и управляющего электрода от приложенного напряжения U .

Из расчетов следует, что даже в отсутствие магнитного поля, сопровождающего электронный поток, коэффициент прохождения через управляющий электрод стремится к единице, а перехват тока диафрагмой не превышает примерно 0,5 % от полного тока катода. Однако с учетом того факта, что этот ток оседал на малую площадь управляющего электрода, при больших напряжениях возможен нагрев участков поверхности на управляющем электроде. Например, в условиях, когда $R = 15$ нм при $U = 20$ кВ (см. рис. 4), ток коллектора составлял 31,5 мА, что уже достаточно для запуска диагностического гиротрона. При этом ток управляющего электрода был равен 0,15 мА. Этот сравнительно небольшой ток оседал на площадь, равную примерно 0,2 см². Выделяемая на этом участке удельная мощность достигала значений около 15 Вт/см². Примерно при таких удельных мощностях в экспериментах, представленных в работе [13], наблюдался ощутимый разогрев коллектора и отмечалось повышение давления в вакуумной камере.

Под воздействием магнитного поля менялись траектории электронов и умень-

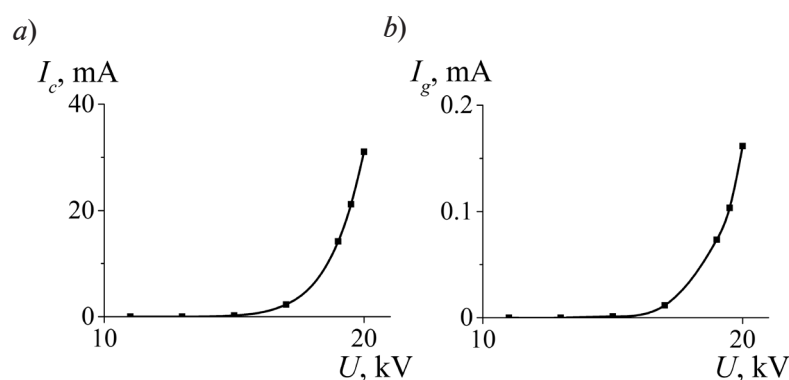


Рис. 4. Типичные зависимости тока электронов от приложенного напряжения: a – ток коллектора, b – ток управляющего электрода. Расчет проведен для катода с $R = 15$ нм, $I_s = 0$

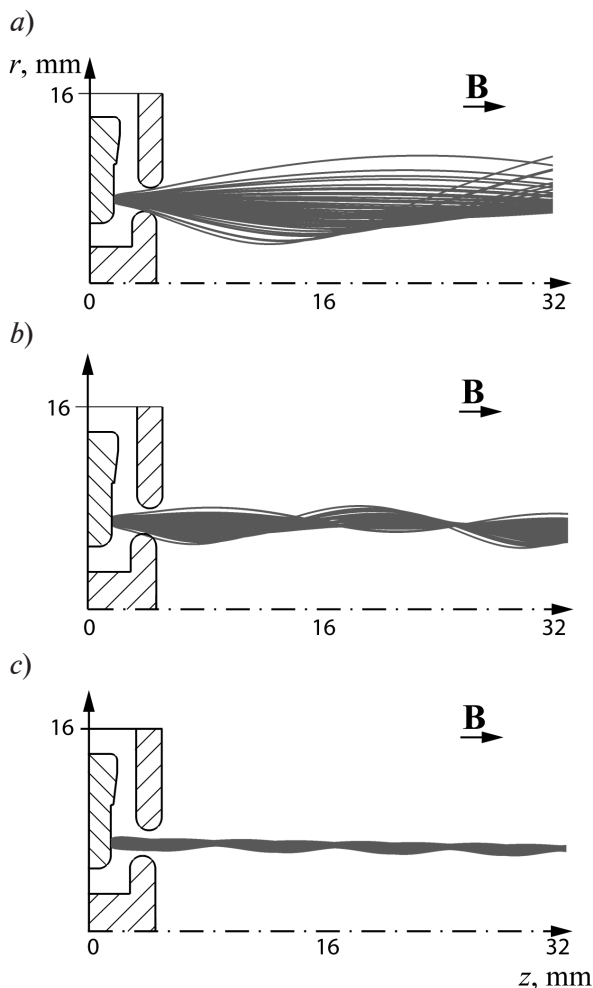


Рис. 5. Типичные траектории электронов в ЭОС при разных значениях тока соленоида I_s , А: 1 (a), 3 (b), 9 (c). Ось вращения ЭОС совпадает с осью z

шался ток, перехватываемый управляющим электродом. Согласно расчетам, при значении магнитной индукции на катоде, равном или превышающем 0,07 Тл, все электроны, покинувшие эмиттер, проходили сквозь диафрагму. Прощедшие диафрагму электроны осаждались на внутренней поверхности канала транспортировки пучка (на коллекторе) на расстоянии (более 500

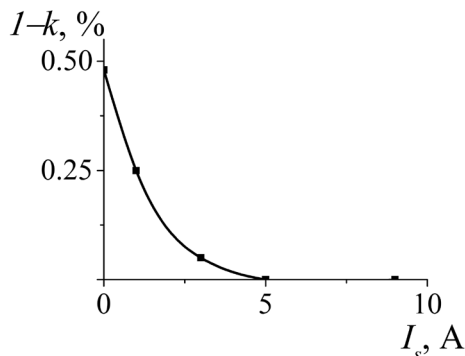


Рис. 6. Величина отношения тока электронов, попавших на управляющий электрод, к полному току катода как функция тока в соленоиде

мм) от катода. На рис. 5 показаны траектории электронов при разных значениях тока соленоида. Рис. 6 иллюстрирует изменение отношения тока управляющего электрода к суммарному току катода при увеличении тока соленоида.

Заключение

В данном исследовании рассмотрена возможность функционирования многоострийных кремниевых эмиттеров с защитными металлфуллереновыми покрытиями в трехэлектродной электронно-оптической системе (ЭОС) с магнитным удержанием. Укажем важнейшие результаты проделанной работы.

Определено влияние магнитного поля на движение электронов в трехэлектродной пушке и продемонстрирована возможность исключить перехват электронов управляющим электродом — диафрагмой.

Показано, что в триодной системе можно получать токи эмиссии, необходимые для работы диагностического гиротрона.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания для вузов (базовая часть) №3.5469.2017.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glyavin M.Yu., 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.

2. Chen Z., Zhang Q., Lan P., Zhu B., Yu T., Cao G., den Engelsen D. Ultrahigh-current field emission from sandwich-grown well-aligned uniform multi-walled carbon nanotube arrays with high adherence strength // Nanotechnology. 2007.

Vol. 18. No. 26. P. 265702.

3. **Li Ch., Zhang Y., Mann M., et al.** High emission current density, vertically aligned carbon nanotube mesh, field emitter array // *Applied Physics Letters*. 2010. Vol. 97. No. 11. P. 113107.

4. **Бушуев Н.А., Глухова О.Е., Григорьев Ю.А. и др.** Исследование эмиссионных характеристик многолучевой электронной пушки с автоэмиссионным катодом из стеклоглерода // *Журнал технической физики*. 2016. Т. 86. № 2. С. 134–139.

5. **Гуляев Ю.В., Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И., Морев С.П., Резчиков А.Ф., Сеницын Н.И., Якунин А.Н.** Новые решения для создания перспективных приборов на основе низковольтной полевой эмиссии углеродных наноразмерных структур // *Письма в Журнал технической физики*. 2013. Т. 39. № 11. С. 63–70.

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. **Whaley D., Duggal R., Armstrong C., Holland C., Spindt C., Thibert D.** High average power field emitter cathode and testbed for X/Ku-band cold cathode TWT // *Proceedings of 2013 IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*. Paris: IEEE, 2013. Pp. 1–2.

8. **Schwoebel P.R., Holland C.E., Spindt C.A.** The development of a stationary X-ray source for medical imaging // *Proceedings of International Vacuum Nanoelectronics Conference*. 2010. July. Palo Alto. CA. IEEE. Pp. 14–15.

9. **Yuan X., Zhu W., Zhang Y., Xu N., Yan Y., Wu J., Shen Y.** A fully-sealed carbon-nanotube cold-cathode terahertz gyrotron // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. P. 32936.

10. **Glyavin M.Yu., Manuilov V.N., Sominskii G.G., Taradaev E.P., Tumareva T.A.** The

concept of an electron-optical system with field emitter for a spectroscopic gyrotron // *Infrared Physics & Technology*. 2016. Vol. 78. September. Pp. 185–189.

11. **Соминский Г.Г., Тумарева Т.А., Тарадаев Е.П., Мишин М.В., Степанова А.Н.** Многоострийные полупроводниковые полевые эмиттеры с двухслойными защитными покрытиями нового типа // *Журнал технической физики*. 2015. Т. 85. № 1. С. 138–142.

12. **Соминский Г.Г., Сезонов В.Е., Тарадаев Е.П. и др.** Полевые эмиттеры нового типа для высоковольтных электронных устройств // *Известия вузов. Радиофизика*. 2015. Т. 58. № 7. С. 568–576.

13. **Соминский Г.Г., Тарадаев Е.П., Тумарева Т.А., Гиваргизов М.Е., Степанова А.Н.** Полевая эмиссия многоострийных кремниевых структур с защитными покрытиями // *Журнал технической физики*. 2016. Т. 86. № 11. С. 108–111.

14. **Гиваргизов Е.И.** Управляемый рост нитевидных кристаллов и создание монокристаллических висцерных зондов // *Кристаллография*. 2006. Т. 51. № 5. С. 947–953.

15. **Тумарева Т.А., Соминский Г.Г.** Работа полевых эмиттеров с активированными фуллереновыми покрытиями в техническом вакууме // *Журнал технической физики*. 2013. Т. 83. № 7. С. 121–124.

16. **Соминский Г.Г., Сезонов В.Е., Тумарева Т.А., Тарадаев Е.П.** Разработка и исследование полевых эмиттеров для коротковолновых СВЧ приборов в СПбПУ. Последние достижения // *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2018. Т. 26. № 3. С. 109–126.

17. **Соминский Г.Г., Тарадаев Е.П.** Оптимизация многоострийных полевых эмиттеров с двуслойными защитными покрытиями // *Журнал технической физики*. 2017. Т. 87. № 6. С. 930–934.

Статья поступила в редакцию 15.11.2018, принята к публикации 17.11.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТАРАДАЕВ Евгений Петрович — кандидат физико-математических наук, инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
evgeny_tar@hotmail.com

СОМИНСКИЙ Геннадий Гиршевич — доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
sominski@rphf.spbstu.ru

REFERENCES

- [1] **M.Yu. Glyavin, A.V. Chirkov, G.G. Denisov, et al.**, Experimental tests of a 263 GHz gyrotron for spectroscopic applications and diagnostics of various media, *Review of Scientific Instruments*. 86 (5) (2015) 054705.
- [2] **Z. Chen, Q. Zhang, P. Lan, et al.**, Ultrahigh-current field emission from sandwich-grown well-aligned uniform multi-walled carbon nanotube arrays with high adherence strength, *Nanotechnology*. 18 (26) (2007) 265702.
- [3] **Ch. Li, Y. Zhang, M. Mann, et al.**, High emission current density, vertically aligned carbon nanotube mesh, field emitter array, *Applied Physics Letters*. 97(11) (2010) 113107.
- [4] **N.A. Bushuev, O.E. Glukhova, Yu.A. Grigorev, et al.**, Emissivity of a multibeam electron gun with a glassy carbon field-emission cathode, *Technical Physics*. 61 (2) (2016) 290–295.
- [5] **Y.V. Gulyaev, N.P. Abanshin, S.P. Morev, et al.**, New solutions for designing promising devices based on low-voltage field emission from carbon nanostructures, *Technical Physics Letters*. 39 (6) (2013) 525–528.
- [6] **D.R. Whaley, R. Duggal, C.M. Armstrong, et al.**, 100 W operation of a cold cathode TWT, *IEEE Transactions on Electron Devices*. 56 (5) (2009) 896–905.
- [7] **D. Whaley, R. Duggal, C. Armstrong, et al.**, High average power field emitter cathode and testbed for X/Ku-band cold cathode TWT, *Proceedings of 2013 IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Paris, IEEE* (2013) 1–2.
- [8] **P.R. Schwoebel, C.E. Holland, C.A. Spindt**, The development of a stationary X-ray source for medical imaging, *Proceedings of International Vacuum Nanoelectronics Conference, Palo Alto, CA, IEEE* (2010) 14–15.
- [9] **X. Yuan, W. Zhu, Y. Zhang, et al.**, A fully-sealed carbon-nanotube cold-cathode terahertz gyrotron, *Scientific Reports*. 6 (2016) 32936.
- [10] **M.Yu. Glyavin, V.N. Manuilov, G.G. Sominskii, et al.**, The concept of an electron-optical system with field emitter for a spectroscopic gyrotron, *Infrared Physics & Technology*. 78 (Sept.) (2016) 185–189.
- [11] **G.G. Sominskii, T.A. Tumareva, E.P. Taradaev, et al.**, Multitip semiconductor field emitters with new-type bilayer protecting coatings, *Technical Physics*. 60(1) (2015) 133–136.
- [12] **G.G. Sominski, V.E. Sezonov, E.P. Taradaev, et al.**, Innovative field emitters for high-voltage electronic devices, *Radiophysics and Quantum Electronics*. 58 (7) (2015) 511–519.
- [13] **G.G. Sominskii, E.P. Taradaev, T.A. Tumareva, et al.**, Field emission of multitip silicon structures with protection coatings, *Technical Physics* 61(11) (2016) 1711–1714.
- [14] **E.I. Givargizov**, Controlled growth of filamentary crystals and fabrication of single-crystal whisker probes, *Crystallography Reports*. 51 (5) (2006) 888–894.
- [15] **T.A. Tumareva, G.G. Sominskii**, Operation of activated-fullerene-coated field emitters in technical vacuum, *Technical Physics*. 58 (7) (2013) 1048–1051.
- [16] **G.G. Sominskii, V.E. Sezonov, T.A. Tumareva, E.P. Taradaev**, Development of field emitters for short wave microwave devices and their investigation in SPbPU: The last achievements, *Applied Nonlinear Dynamics. Izvestiya VUZ*. 26 (3) (2018) 109–126.
- [17] **G.G. Sominskii, E.P. Taradaev**, Optimization of multi-tip-shaped field emitters with bilayer protective coatings, *Technical Physics*. 62(6) (2017) 948–952.

Received 15.11.2018, accepted 17.11.2018.

THE AUTHORS

TARADAEV Evgeny P.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
evgeny_tar@hotmail.com

SOMINSKII Gennadii G.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
sominski@rphf.spbstu.ru