

## О сокращении длительности переходного процесса генерации в релятивистском генераторе бегущей волны диапазона 2.4 GHz на основе полой замедляющей системы

© Е.М. Тотьменинов,<sup>1</sup> А.И. Климов,<sup>1,2</sup> В.Ю. Конев,<sup>1</sup> О.П. Кутенков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050 Томск, Россия  
e-mail: totm@lfe.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 17 ноября 2017 г.)

Численно и экспериментально продемонстрировано уменьшение длительности переходного процесса генерации в релятивистском СВЧ генераторе бегущей волны, в котором взаимодействие осуществляется между релятивистским электронным пучком и основной гармоникой попутной электромагнитной волны, замедленной до скорости света в полой замедляющей системе. Показано, что в данном режиме достигается высокое сопротивление связи пучка с волной вплоть до  $\approx 10 \Omega$ , что обеспечивает сокращение переходного процесса. В эксперименте получена пиковая мощность микроволновой генерации  $210 \pm 40 \text{ MW}$  на частоте 2.45 GHz в ведущем магнитном поле 0.16 Т. Эффективность генератора по преобразованию мощности электронного пучка в электромагнитное излучение составила  $17 \pm 3\%$ . При длительности импульса тока пучка около 50 ns длительность микроволнового импульса составила около 20 ns, а время переходного процесса около 22 ns.

DOI: 10.21883/JTF.2018.07.46182.2568

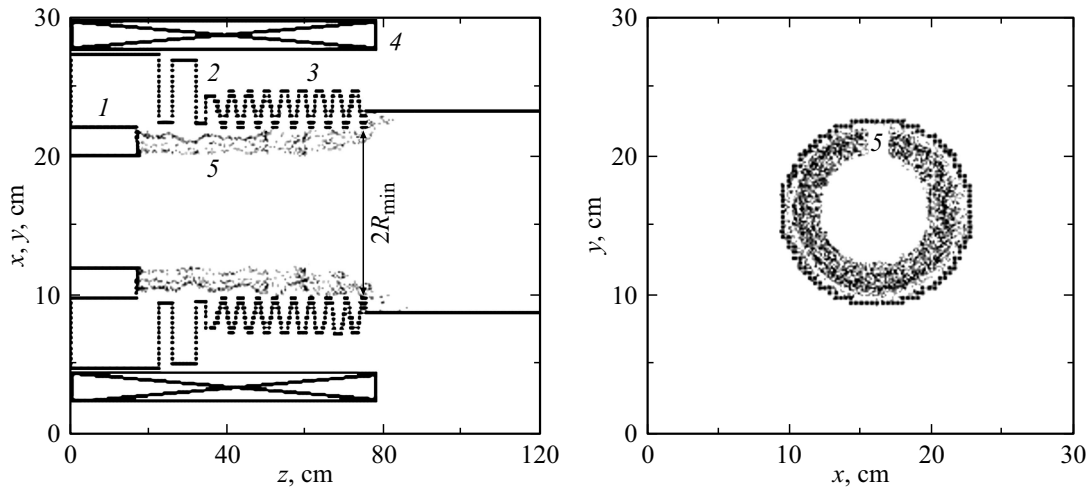
### Введение

Типичное время установления СВЧ колебаний в релятивистских черенковских СВЧ генераторах на основе полых замедляющих систем, например в лампе обратной волны (ЛОВ), составляет около  $100T$ , где  $T$  — период колебаний. Это обстоятельство требует достаточной длительности импульса тока пучка, что сужает круг импульсных высоковольтных источников, которые могут быть использованы для питания данных генераторов, а также создает трудности при их продвижении в более низкочастотный диапазон. Известно, что принципиальное значение для возможности возбуждения черенковских генераторов имеет сопротивление связи ( $Z$ ) электронного пучка с синхронной гармоникой, которое, в частности, определяет время установления СВЧ колебаний (длительность переходного процесса). Так, например, в релятивистской лампе обратной волны на основе коаксиального волновода (КРЛОВ) расчетное время раскочки колебаний составляло  $\approx 30T$ , для частоты генерации 1.25 GHz при сопротивлении связи электронного пучка с синхронной „–1“ гармоникой волны ТЕМ около  $Z_1 \approx 10 \Omega$  [1]. Однако в процессе экспериментальных исследований КРЛОВ был выявлен ряд недостатков данной схемы: сложная система крепления и юстировки центрального проводника коаксиальной линии (нарушение юстировки приводит к возбуждению конкурирующих несимметричных колебаний), необходимость использования сильных ведущих магнитных полей для транспортировки электронного пучка [1]. Короткое время переходного процесса также достигается в гене-

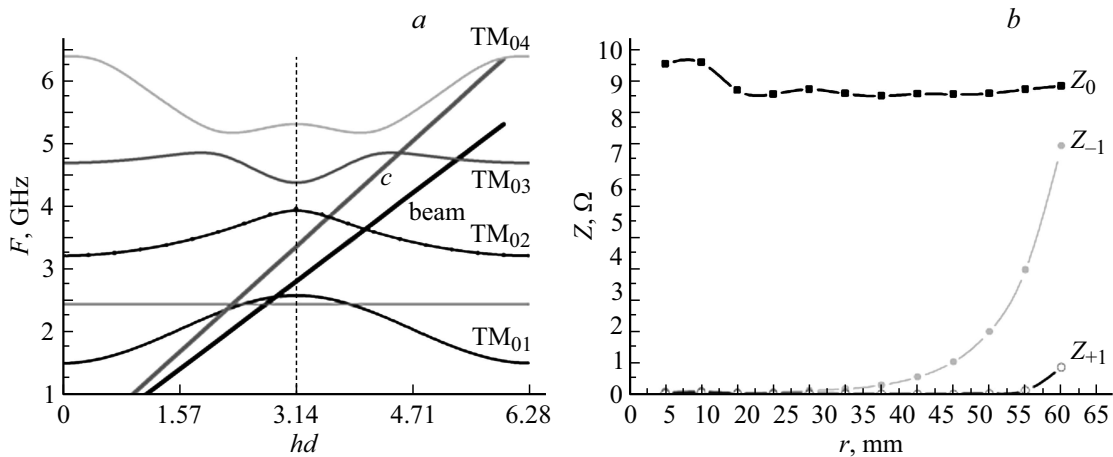
раторах на основе виртуального катода [2]. Однако эффективность этих приборов невелика, и наличие анодной сетки, постепенно разрушающейся под действием потока электронов, существенно ограничивает возможность их практической эксплуатации в длительных импульсно-периодических режимах.

Механизм, в котором предварительно промодулированный электронный пучок взаимодействует с основной гармоникой попутной волны, фазовая скорость которой замедлена в полой замедляющей системе (ЗС) до скорости света, был предложен и реализован в работах [3,4]. Было показано [5], что в этом случае также достигается сильная (величина  $Z$  может достигать до  $\approx 10 \Omega$ ) связь электронного пучка с электромагнитной волной и создается условие для существенного сокращения времени установления СВЧ колебаний. Данные результаты были заложены в схему релятивистского генератора бегущей волны (РГБВ) с электронным пучком увеличенного поперечного сечения [6], для которого характерна близкая к КРЛОВ и виркатору расчетная длительность переходного процесса  $\approx 30T$ .

Целью настоящей работы была экспериментальная проверка предложенной схемы РГБВ, разработанной для частоты генерации около 2.4 GHz. Все необходимые численные расчеты генератора, представленные в настоящей работе, были выполнены с помощью 3D-версии полностью электромагнитного нестационарного численного PIC-кода KARAT [7], который успешно применяется при разработке и реализации различных типов СВЧ генераторов [4,8–10].



**Рис. 1.** Конструкция СВЧ генератора: 1 — взрывоэмиссионный катод с увеличенной площадью эмиссионной поверхности, 2 — модулирующий рефлектор, 3 — ЗС, 4 — соленоид, 5 — электронный пучок. Справа — вид электронного пучка с торца.



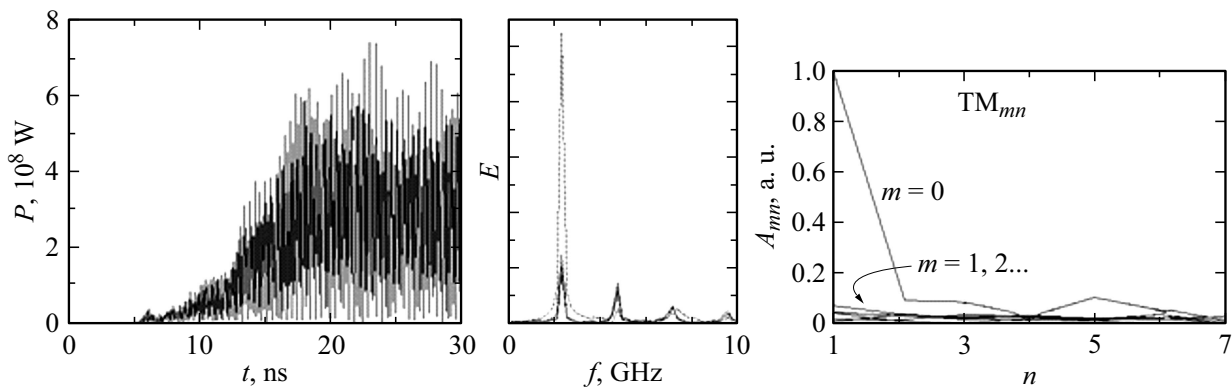
**Рис. 2.** *a* — дисперсионные кривые различных типов симметричных электрических волн ЗС генератора (*c* — линия света, beam — линия пучка); *b* — результат расчета радиальной зависимости сопротивлений связи первых трех гармоник волны  $TM_{01}$  для  $F \approx 2.45$  GHz с помощью электродинамической программы на основе метода матриц рассеяния [12]:  $Z_0$  — сопротивление связи с основной гармоникой при  $|\beta_{ph,0}| \approx 0.99$ ,  $Z_{-1}$  — с „-1“ гармоникой при  $|\beta_{ph,-1}| \approx 0.55$ ,  $Z_{+1}$  — с „+1“ гармоникой при  $|\beta_{ph,+1}| \approx 0.27$ .

### Конструкция генератора и результаты 3D-моделирования

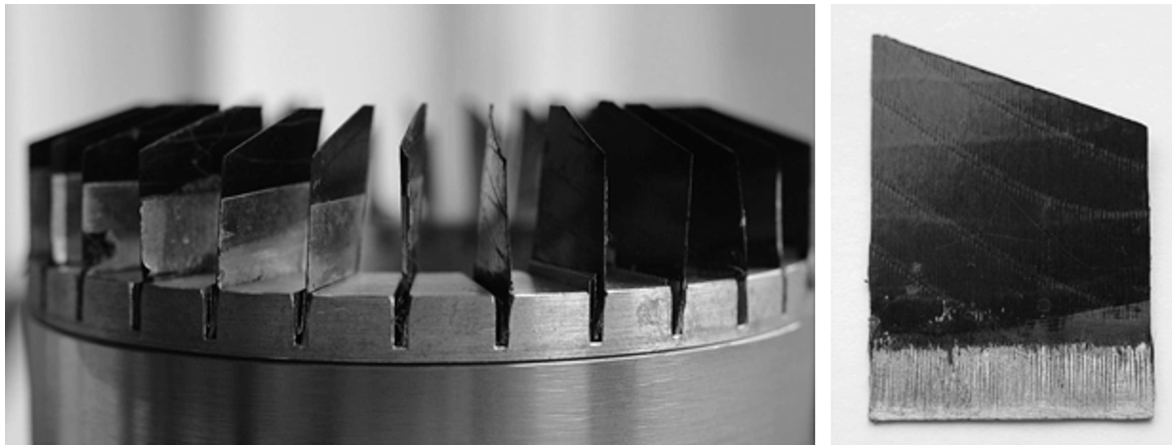
Схема РГБВ с магнитной системой и электронным пучком представлена на рис. 1. В данной конструкции входной модулирующий рефлектор необходим для отражения части СВЧ мощности генерируемой волны  $TM_{01}$ , распространяющейся в сторону катода. Другая функция данного элемента состоит в предварительной модуляции электронного потока по энергии [11].

Физический принцип работы прибора был описан ранее в [3] и основан на взаимодействии, предварительно промодулированного по скорости электронного пучка, с основной гармоникой попутной волны  $TM_{01}$  при отрицательной кинематической расстройке синхронизма (волна обгоняет электроны) (рис. 2, *a*):  $\delta_0 = 1/\beta_{ph,0} - 1/\beta_0$ , где

$\beta_0$  — нормированная на скорость света начальная продольная скорость электронов,  $\beta_{ph,0} \approx 1$ . Внутренняя обратная связь в генераторе главным образом обеспечивается за счет распределенных отражений в ЗС. Внешний радиус электронного пучка  $r_{c,max} = 60$  mm ограничен условием его прохождения через ЗС без потерь. Внутренний радиус определяется из следующего условия. Предварительная модуляция электронного пучка в области рефлектора осуществляется в поле волны  $TM_{02}$  [12], для которой радиальное распределение продольной компоненты электрического поля описывается функцией  $E_z^{02}(r) \propto J_0(\nu_{02}r)$ , где  $\nu_{02}$  — второй корень функции Бесселя нулевого порядка  $J_0$ . Из условия сохранения знака функции  $J_0$  (фазы модулирующего поля) получаем ограничение на внутренний радиус пучка  $r_{c,min} = 40$  mm:  $J_0(\nu_{02}r_{c,min}/R_r) = 0$ , где  $R_r$  — максимальный радиус модулирующего рефлектора.



**Рис. 3.** Расчетная зависимость СВЧ мощности от времени и спектр электрического ВЧ поля (главный максимум соответствует частоте 2.45 GHz) для напряжения на диоде 440 kV и тока пучка 2.7 kA. Уровень стационарной генерации около 290 MW. Ведущее магнитное поле 0.2 Т. Справа показаны расчетные относительные значения амплитуд  $A_{mn}$  различных волн типа  $TM_{mn}$  ( $m$  — азимутальный,  $n$  — радиальный индексы) в режиме установившейся генерации (относительные амплитуды волн типа  $TE_{mn}$  составляют менее 0.1).



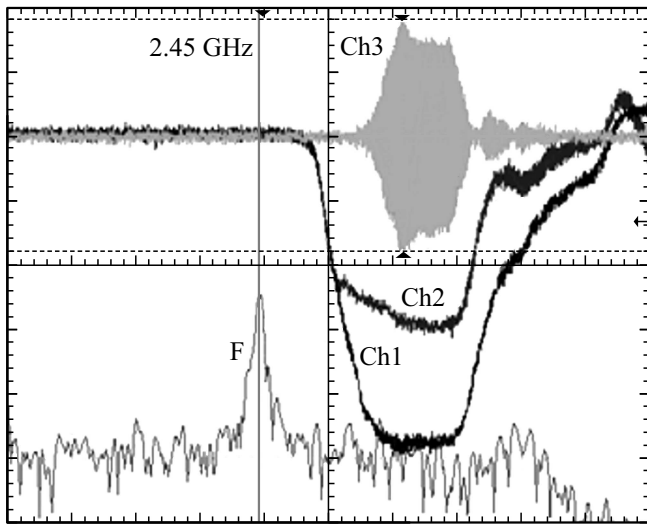
**Рис. 4.** Фотографии взрывоэмиссионного катода и лезвия из углепластика.

Сопротивление связи  $Z_0$  основной гармоники волны  $TM_{01}$ , замедленной до скорости света в области ЗС, с электронным пучком можно оценить на основании [5] с помощью выражения:  $Z_0 = 960/k^4 R_{\min}^4 [\Omega]$ , где  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  — длина волны излучения,  $R_{\min}$  — минимальный радиус гофрировки. Для параметров использованной ЗС (рис. 1) и частоты генерации  $F \approx 2.45$  GHz значение  $Z_0 = 9.4 \Omega$  ( $\bar{Z}_0 = 1/R_{\min} \int_0^{R_{\min}} Z_0(r) dr \approx 9.0 \Omega$ , рис. 2, b).

В результате 3D-оптимизации геометрии электродинамической системы генератора и параметров электронного пучка был рассчитан режим генерации с эффективностью преобразования мощности электронного пучка в электромагнитное излучение около 24% на рабочей частоте 2.45 GHz (рис. 3), которая соответствует режиму взаимодействия с волной  $TM_{01}$  (рис. 2, a). Расчетная длительность переходного процесса генерации составила около 17 ns ( $\approx 40T$ ).

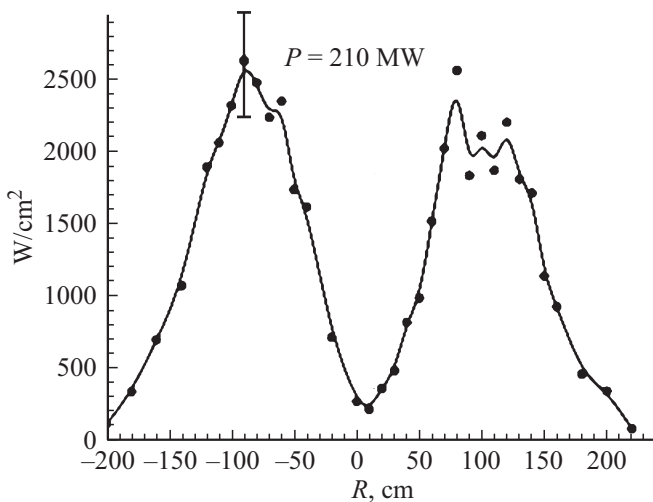
## Эксперимент

Эксперимент был выполнен на сильноточном ускорителе электронов „СИНУС-7“ с длительностью импульса напряжения на диоде около 50 ns при длительности фронта около 18 ns. Амплитуды напряжения на диоде и тока диода составляли около 420 kV и 3.9 kA соответственно. Взрывная эмиссия электронов осуществлялась с поверхности лезвийного катода (рис. 4). Катод представлял собой латунную подложку, поверх которой устанавливались лезвия из углепластика. Профиль лезвий был изготовлен в соответствии с расчетами, чтобы не происходило существенной экранировки внутренних областей эмиссии внешним электронным потоком. Выбор углепластика в качестве эмиссионного материала обусловлен результатом предварительных тестовых экспериментов. В условиях пониженных ведущих магнитных полей было обнаружено, что среди различных тестируемых катодных материалов (графит, металл-диэлектрик,



Ch1 90.0 kV Ch2 1.5 kA Ch3 1.0 V M 20.0 ns  
Match 20.0 dB 625 MHz

**Рис. 5.** Типичные формы импульсов напряжения на диоде (Ch1), тока диода (Ch2), радиосигнала (Ch3) и спектр генерации (F). Центральная частота равна 2.45 GHz.



**Рис. 6.** Распределение плотности потока пиковой мощности излучения, измеренное на расстоянии 5 м от окна излучающего рупора. В каждой точке проводилось усреднение по 5 импульсам. Относительная погрешность измерения мощности СВЧ излучения равна  $\pm 14\%$ .

углепластик) катод из углепластика обладает наименьшим временем запаздывания фронта тока относительно фронта напряжения на диоде. Это означает, что для данного типа катода процесс формирования взрывоэмиссионных центров идет более быстрым темпом, что в конечном итоге приводит к росту их числа за счет ослабления эффекта взаимной экранировки соседних эмиссионных центров. Коллекторные измерения тока пучка, прошедшего в область ЗС, показали, что его значение на  $\approx 20\%$  меньше полного тока вакуумного диода и составляет  $\approx 3.0$  кА. Потери тока, по-видимому,

связаны с утечкой электронов за счет взрывной эмиссии с поверхности катододержателя диаметром 120 мм, который был изготовлен из нержавеющей стали.

СВЧ излучение выводилось в открытое пространство с помощью рупорной антенны с диаметром излучающей апертуры 450 мм. С целью минимизации отражений волн от стен рабочего помещения использовались радиопоглощающие покрытия. СВЧ сигнал принимался антенной в виде короткого электрического вибратора [13], передавался в экранированное помещение с помощью кабеля с тефлоновым заполнением РК50-4-47 и регистрировался осциллографом Tektronix TDS-6604 с рабочей полосой 6 GHz. Для измерений спектра генерируемых импульсов применялся встроенный в осциллограф аппарат быстрого преобразования Фурье. Эффективное сечение приемной антенны составляло  $1.2 \text{ cm}^2$  при погрешности его измерения  $\pm 13\%$ .

В эксперименте для указанных выше параметров электронного пучка были получены импульсы СВЧ излучения с длительностью  $\tau \approx 20 \text{ ns}$  по уровню 0.7 от пикового значения их амплитуд (рис. 5). Длительность переходного процесса составила около 22 ns ( $\approx 54T$ ). Стандартное отклонение пиковых амплитуд СВЧ сигналов составляло  $\pm 2.5\%$ , что соответствовало стандартному отклонению пиковой мощности  $\pm 5\%$ . Пиковая мощность СВЧ излучения, полученная путем интегрирования плотности потока мощности (рис. 6), составила  $210 \pm 30 \text{ MW}$ . Это соответствует пиковой эффективности преобразования мощности электронного пучка в электромагнитное излучение  $13 \pm 2\%$ . За вычетом потерь тока в области вакуумного диода эффективностью прибора может быть оценена величиной  $17 \pm 3\%$ .

## Заключение

Экспериментальные исследования продемонстрировали, что время установления СВЧ колебаний в РГБВ, использующем синхронизм электронов с замедленной до скорости света основной гармоникой рабочей волны, составляет около  $54T$ . Это время, очевидно, завышено по сравнению с расчетным ( $\approx 40T$ ) из-за существенной длительности фронта напряжения на диоде ускорителя электронов — 18 ns. Укорочение фронта может дать дополнительное сокращение длительности переходного процесса, которая в этом случае станет сопоставимой с длительностью переходного процесса, типичной для КРЛОВ или виркатора, при более простой конструкции РГБВ и возможностью реализации длительного импульсно-периодического режима работы в условиях пониженных ведущих магнитных полей. При этом создаются предпосылки для продвижения РГБВ в более низкочастотный диапазон.

Авторы выражают благодарность Кицанову С.А. за помощь в проведении эксперимента.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 16-08-00004\_а.

## Список литературы

- [1] Тотьменинов Е.М., Климов А.И., Конев В.Ю., Пегель И.В., Ростов В.В., Цыганков Р.В., Тараканов В.П. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 4. С. 23–32. [Totmeninov E.M., Klimov A.I., Konev V.Yu., Pegel I.V., Rostov V.V., Tsygankov R.V., Tarakanov V.P. // Tech. Phys. Lett. 2014. Vol. 40. N 2. P. 152–156. doi: 10.1134/S1063785014020278]
- [2] Кицанов С.А., Климов А.И., Коровин С.Д., Куркан И.К., Пегель И.В., Полевин С.Д. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 5. С. 82–90. [Kitsanov S.A., Klimov A.I., Korovin S.D., Kurkan I.K., Pegel I.V., Polevin S.D. // Tech. Phys. 2002. Vol. 47. N 5. P. 595–603.]
- [3] Климов А.И., Коровин С.Д., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 10. С. 829–836. [Klimov A.I., Korovin S.D., Rostov V.V., Totmeninov E.M. // Radiophys. Quant. Electron. 2006. Vol. 49. N 10. P. 747–753. UDC: 621.385.623]
- [4] Totmeninov E.M., Vykhodtsev P.V., Stepchenko S.A., Klimov A.I. // IEEE Trans. Electron. Dev. 2017. Vol. 64. N 5. P. 2398–2402. doi: 10.1109/TEDE.2017.2686447.
- [5] Тотьменинов Е.М., Климов А.И. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 6. С. 153–155. [Totmeninov E.M., Klimov A.I. // Tech. Phys. 2016. Vol. 61. N 6. P. 950–952. doi: 10.1134/S1063784216060232]
- [6] Totmeninov E.M. // Trans. Plasm. Sci. 2016. Vol. 44. N 8. P. 1276–1279. doi: 10.1109/TPS.2016.252466
- [7] Тараканов В.П. Математическое моделирование. Проблемы и результаты. М.: Наука, 2003. С. 456–476.
- [8] Kitsanov S.A., Klimov A.I., Korovin S.D., Kurkan I.K., Pegel I.V., Polevin S.D. // IEEE Trans. Plasm. Sci. 2002. Vol. 30. N 1. Pt. 2. P. 274–285. doi: 10.1109/TPS.2002.1003871
- [9] Totmeninov E.M., Klimov A.I., Kurkan I.K., Polevin S.D., Rostov V.V. // IEEE Trans. Plasm. Sci. 2008. Vol. 36. N 5. P. 2609–2612. doi: 10.1109/TPS.2008.2004239
- [10] Totmeninov E.M., Kitsanov S.A., Vykhodtsev P.V. // IEEE Trans. Plasm. Sci. 2011. Vol. 39. N 4. Pt. 2. P. 1150–1153. doi: 10.1109/TPS.2011.2106520
- [11] Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 12. С. 1189–1196. [Korovin S.D., Kurkan I.K., Rostov V.V., Totmeninov E.M. // Radiophys. Quant. Electron. 1999. Vol. 42. N 12. P. 1047–1054. UDC 621.385.62]
- [12] Denisov G.G., Lukovnikov D.A., Samsonov S.V. // Int. J. Infrar. Millim. Waves. 1995. Vol. 16. N 4. P. 745–752.
- [13] Klimov A.I., Konev V.Yu. Proc. 15th Int. Symp. High Cur. Electron. Tomsk, Russia: IHCE SB RAS. 2008. P. 434–436.