



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-44-51>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.385

ГИРО-ЛБВ-УМНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ

С. В. КОЛОСОВ, О. О. ШАТИЛОВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 24.11.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Усилители гиротронного типа разрабатываются для различных приложений, требующих высокой мощности в миллиметровом диапазоне длин волн. Расчеты оптимальных конструкций гиротронных ламп бегущей волны (гирос-ЛБВ), представленные в статье, проведены с использованием компьютерной программы Gyro-K с помощью методики преобразования координат, позволяющей существенно сократить время расчетов гирорезонансных приборов за счет сведения трехмерной задачи возбуждения нерегулярного волновода к одномерной. Рассмотрены два варианта создания гирос-ЛБВ на моде волны TE_{02} : первый – работающий на первой гармонике гирочастоты, второй – умножитель частоты. Приведены достижимые характеристики приборов в терагерцевом диапазоне частот – такие как полосы усиления, КПД, коэффициенты усиления и распределения высокочастотных полей в продольном и поперечном сечениях. Гирос-ЛБВ-умножитель частоты обладает полосой усиления 7,2 %, КПД – 17 % и коэффициентом усиления 30 Дб.

Ключевые слова: гиротронная лампа бегущей волны, миллиметровый диапазон, длина волны, умножитель частоты.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Колосов, С. В. Гирос-ЛБВ-умножитель частоты / С. В. Колосов, О. О. Шатилова // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 3. С. 44–51. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-44-51>.

GYRO-TWT FREQUENCY MULTIPLIER

STANISLAV V. KOLOSOV, OLGA O. SHATILOVA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 24.11.2023

Abstract. Gyrotron-type amplifiers are being developed for various applications requiring high power in the millimeter wavelength range. Calculations of the optimal designs of gyrotron traveling wave tubes (gyro-TWTs), presented in the article, were carried out using the Gyro-K computer program using a coordinate transformation technique, which made it possible to significantly reduce the calculation time of gyroresonance devices by reducing the three-dimensional problem of excitation of an irregular waveguide to a one-dimensional one. Two options for creating a gyro-TWT using the TE_{02} wave mode are considered: the first one is operating at the first harmonic of the gyrofrequency, the second is a frequency multiplier. The achievable characteristics of devices in the terahertz frequency range are presented, such as gain bands, efficiency, gain factors and distributions of high-frequency fields in longitudinal and transverse sections. The gyro-TWT frequency multiplier has a gain bandwidth of 7.2 %, an efficiency of 17 %, and a gain of 30 dB.

Keywords: traveling wave gyrotron tube, millimeter wave, wavelength, frequency multiplier.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Kolosov S. V., Shatilova O. O. (2024) Gyro-TWT Frequency Multiplier. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 44–51. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-44-51> (in Russian).

Введение

Создание широкополосных усилителей в диапазоне частот, близких к терагерцевому, – актуальная задача. Наиболее перспективные в этом смысле гиротронные лампы бегущей волны (ги-ро-ЛБВ). Они могут использоваться в качестве широкополосных усилителей большой мощности в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн [1–7].

В статье выполнен анализ характеристик широкополосной ги-ро-ЛБВ при работе на моде волны TE_{02} , где азимутальный индекс волны равен нулю, а радиальный – двум. В качестве прототи-па рассматривался вариант ги-ро-ЛБВ, приведенный в [8], где принимались следующие данные: ускоряющее напряжение $U = 70$ кВ, электронный ток $I_0 = 9$ А, питч-фактор $q = V_{\perp} / V_{\parallel} = 1,0$, коэф-фициент усиления $K_{yc} = 40$ дБ, полоса усиления $\Delta f/f = 8$ ГГц. Для расчетов использовали прог-рамму Gyro-K [9]. Математическая модель программы Gyro-K процессов, происходящих в ги-рорезонансных приборах, основывалась на двух взаимосвязанных системах дифференциальных уравнений [9, 10]:

1) возбуждения электромагнитных волн в осесимметричном продольно-нерегулярном волно-воде релятивистским электронным пучком;

2) движения электронов в заданных электромагнитных полях.

Уравнения возбуждения нерегулярного волновода построены на основе метода преобразо-вания координат А. Г. Свешникова [11, 12], заключающегося в замене задачи о возбуждении нерегулярного волновода одномерной задачей о возбуждении собственных волн регулярного волновода с единичным радиусом. Процесс самосогласования уравнений движения электронов и возбуждения ими собственных волн регулярного волновода производится на основе метода Галеркина [13]. Такой подход к решению электродинамической задачи позволяет сократить вре-мя компьютерных расчетов в 10 и даже в 100 раз, по сравнению с решением подобных задач с использованием PIC-технологий.^{1,2,3,4,5}

В программе Gyro-K можно учитывать одновременно любое множество типов мод (как TE -, так и TM -типов) для различных номеров гармоник основной рабочей частоты. Параметры при-боров ги-ро-ЛБВ задаются в нормированном виде. Например, все длины определяются в радиа-нах ($z = 2\pi Z/\lambda_0$, где λ_0 – рабочая длина волны), скорости нормируются к скорости света. Это поз-воляет не привязывать результаты расчетов к конкретной рабочей частоте, что обеспечивает применимость полученных значений к любой частоте, за исключением учета омических потерь в стенках волновода, который осуществляется согласно методу Щукина–Леонтовича.

Проведение исследований и их результаты

Расчеты проводили в соответствии с [8] для рабочей частоты 95 ГГц и моды вол-ны TE_{02} . В результате получены следующие результаты: ток электронного пото-ка 13 А $\left(\sigma = \frac{\eta_0 \mu_0}{A} I_0 = 0,73723 \cdot 10^{-3} I_0 [A] = 0,09584 \right)$; ускоряющее напряжение 64 кВ $\left(\beta_0 = \frac{v_0}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{(1,957 \cdot 10^{-6} V_0 + 1)^2}} = 0,4585 \right)$; питч-фактор $q = V_{\perp} / V_{\parallel} = 1,0$; нормированный ра-диус волновода $g = \frac{2\pi R_w}{\lambda_0} = 7,43$; нормированная длина прибора $l = \frac{2\pi L_w}{\lambda_0} = 288,38$ рад.; число электронных траекторий 48; число шагов 8000.

¹ Ludeking L., Bettenhausen M., Smithe D., Yayas S. (1999) MAGIC, User's Manual. *Mission Research Corporation*.

² MAFIA, User's Guide, Version 4.0, CST GmbH. Darmstadt, Germany.

³ Tarakanov V. P. (1992) User's Manual for Code KARAT. USA, Berkley Research Associates.

⁴ Betton M., Antonsen T., Levush B., Nquyen K., Vlasov A. (1998) MAGY: A Time-Dependent Code for Simulation of Slow and Fast Microwave Devices. *IEEE, Trans. Plasma Sci.* 26 (3), 882–892.

⁵ CST Studio Suite Charged Particle Simulation. *Dassault Systemes Deutschland GmbH Version 2020.0*.

Все параметры на приведенных в статье рисунках представлены в нормированном виде. На рис. 1 изображены интегральные характеристики для рассчитанного варианта gyro-ЛБВ. В данной gyro-ЛБВ достаточно эффективно происходит поперечная группировка электронного потока на второй гармонике гирочастоты (кривая 3).

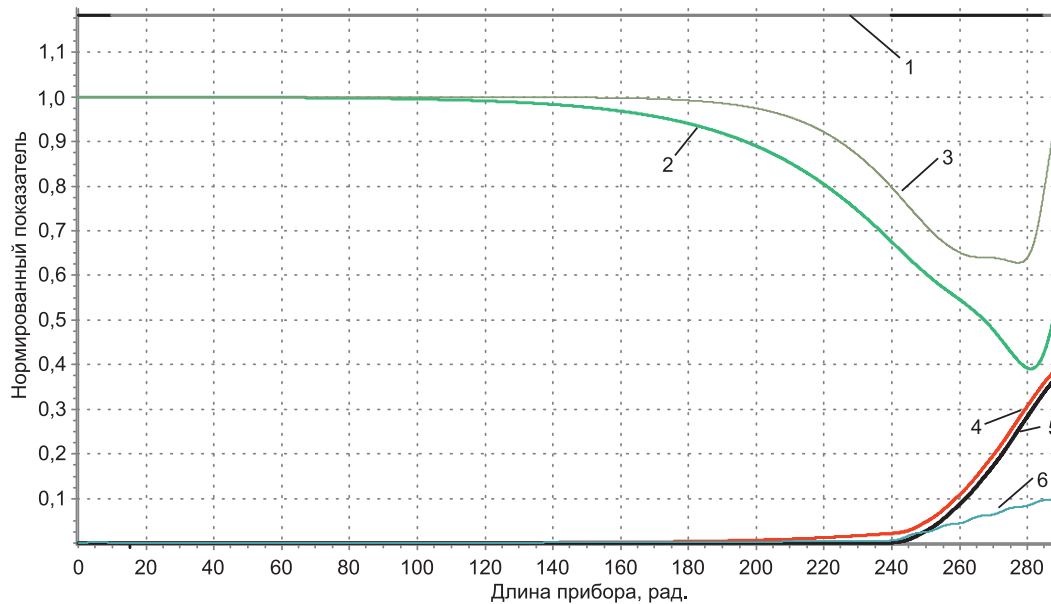


Рис. 1. Интегральные характеристики рассчитанного варианта gyro-ЛБВ:

1 – профиль волновода; 2, 3 – функция поперечной группировки электронов по первой и второй гармоникам гирочастоты соответственно;

4, 5 – электронный и волновой КПД соответственно; 6 – нормированная амплитуда моды волны TE_{02}

Fig. 1. Integral characteristics of the calculated version of the gyro-TWT: 1 – waveguide profile;

2, 3 – function of transverse grouping of electrons at the first and second harmonics of the gyrofrequency, respectively; 4, 5 – electronic and wave efficiency, respectively;

6 – normalized amplitude of the TE_{02} wave mode

Электронный КПД – это относительная энергия, отданная электронным потоком электромагнитным волнам, на рис. 1 он составляет 37 %. Волновой КПД – относительная энергия, переносимая электромагнитным полем. Разница между электронным и волновым КПД – это потери энергии в стенках волновода. На рис. 2 представлены частотные характеристики gyro-ЛБВ для обоих КПД, где в процессе расчетов при коэффициенте усиления 41,7 дБ полоса усиления составила 12,6 %.

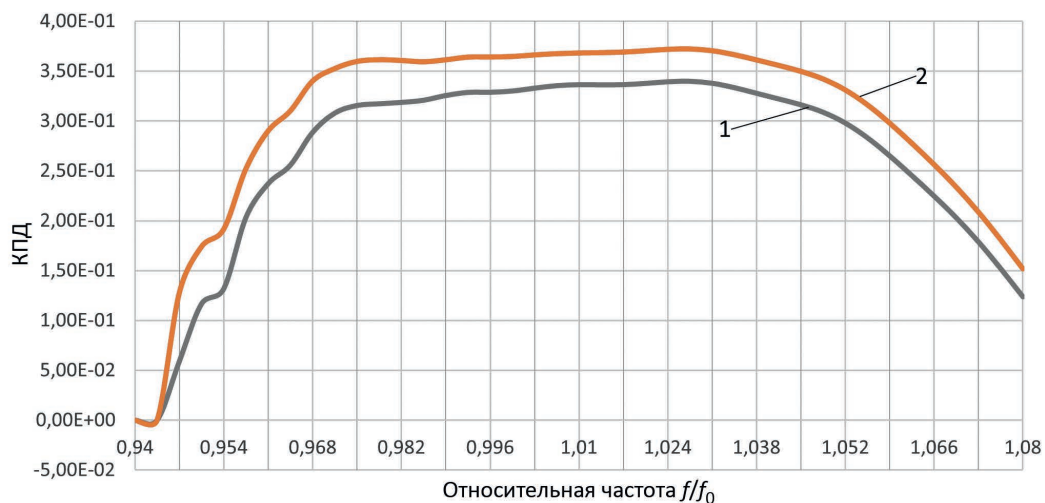


Рис. 2. Частотная характеристика gyro-ЛБВ для КПД: 1 – волнового; 2 – электронного

Fig. 2. Frequency response of the gyro-TWT for efficiency: 1 – wave; 2 – electronic

На рис. 3 показаны распределения модуля высокочастотного поля в продольном и поперечном сечениях волновода.



Рис. 3. Распределения модуля высокочастотного поля в продольном (а) и поперечном (b) сечениях волновода

Fig. 3. Distributions of the modulus of the high-frequency field in the longitudinal (a) and transverse (b) sections of the waveguide

В гирорезонансных приборах функции поперечной группировки электронного потока определяются следующим образом:

– по первой гармонике:

$$F_1 = 1 - \left\{ \left[\sum_{s=1}^{N_s} G_s \left(\frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \cos(\alpha_{is}) \right) \right]^2 + \left[\sum_{s=1}^{N_s} G_s \left(\frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \sin(\alpha_{is}) \right) \right]^2 \right\};$$

– по второй гармонике:

$$F_2 = 1 - \left\{ \left[\sum_{s=1}^{N_s} G_s \left(\frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} 2\cos(\alpha_{is})\sin(\alpha_{is}) \right) \right]^2 + \left[\sum_{s=1}^{N_s} G_s \left(\frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} (2\cos^2(\alpha_{is}) - 1) \right) \right]^2 \right\},$$

где s – параметр, определяющий номер слоя электронного потока; i – номер электронной траектории в s -м слое; α_{is} – относительная фаза вращения электрона на ларморовской орбите.

Если отсутствует поперечная группировка электронов на ларморовской орбите, то функции F_1 и F_2 равны единице, а группировка приводит к уменьшению этих величин вплоть до нуля. Поэтому был исследован вариант умножителя частоты на gyro-ЛБВ на моде волны TE_{02} . Результаты оптимизационных расчетов представлены на рис. 4–6.

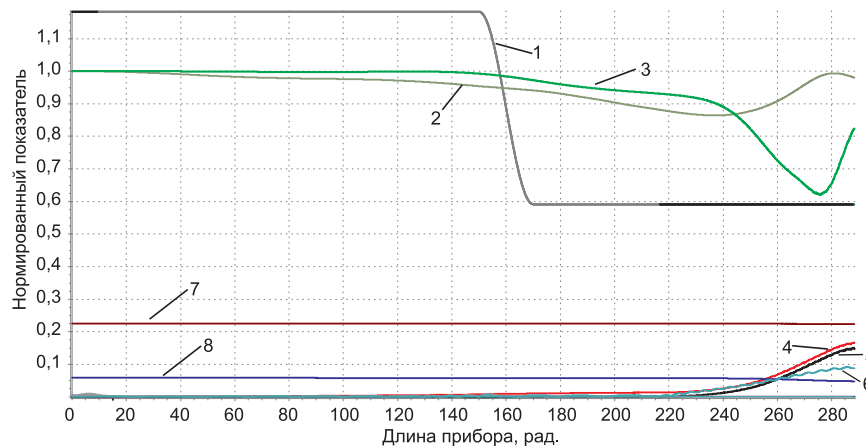


Рис. 4. Интегральные характеристики умножителя частоты на gyro-ЛБВ на моде волны TE_{02} :

1–6 – то же, что на рис. 1; 7 – радиус ведущего центра вращения электронов;

8 – средний радиус вращения электронов на ларморовской орбите

Fig. 4. Integral characteristics of a frequency multiplier on a gyro-TWT on the TE_{02} wave mode:

1–6 – the same as in Fig. 1; 7 – radius of the leading center of electron rotation;

8 – average radius of rotation of electrons in the Larmor orbit



Рис. 5. Распределение модуля напряженности электромагнитного поля в продольном сечении волновода
Fig. 5. Distribution of the electromagnetic field intensity modulus in the longitudinal section of the waveguide

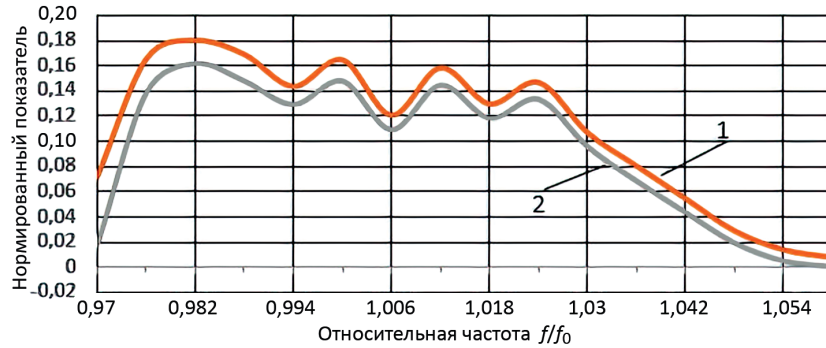


Рис. 6. Частотная характеристика gyro-ЛБВ-умножителя частоты: 1 – КПД-E; 2 – КПД-V
Fig. 6. Frequency response of gyro-TWT frequency multiplier: 1 – efficiency-E; 2 – efficiency-V

Для эффективной работы рассматриваемой gyro-ЛБВ пришлось увеличить значения электронного тока в 1,4 раза и входной мощности в 12 раз. Электронный КПД достиг 17 %, а полоса усиления 7,2 %.

Расчеты gyro-ЛБВ, работающей на первой гармонике гирочастоты, проводили с учетом только моды волны TE_{02} . Следует отметить, что и расчеты gyro-умножителя частоты тоже проводили с учетом мод данной волны на ее первой и второй гармониках. Распределение поперечной скорости электронов, нормированной к скорости света (ось ординат), по длине gyro-ЛБВ (ось абсцисс) показано на рис. 7.

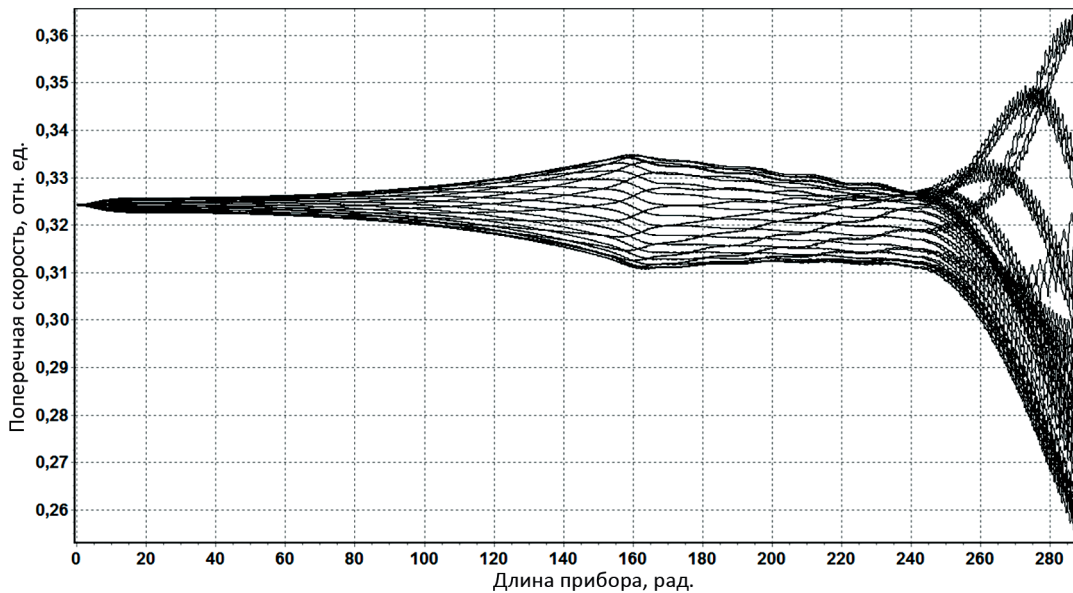


Рис. 7. Распределение поперечных скоростей электронов по длине лампы бегущей волны
Fig. 7. Distribution of transverse electron velocities along the length of a traveling wave lamp

Согласно рис. 7, начиная с длины прибора 160 рад., траектории скоростей имеют излом. Это можно объяснить тем, что при резком сужении волновода следует учитывать большее число вол-

новых мод. Провели расчеты с учетом трех мод TE_{02} , TE_{03} и TE_{04} для первой и второй волновых гармоник. В этом случае распределение поперечных скоростей электронов стало более гладким – без изломов скоростей (рис. 8).

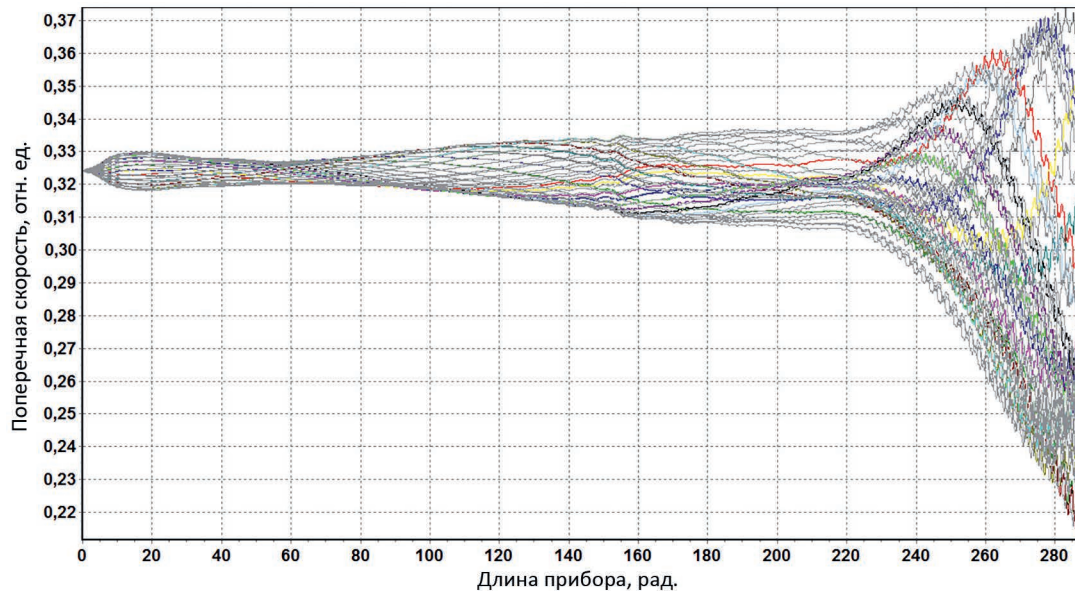


Рис. 8. Распределение продольных скоростей электронов с учетом трех волновых мод
Fig. 8. Distribution of longitudinal electron velocities taking into account three wave modes

Исследовали влияние начального поперечного разброса скоростей электронов на эффективность работы ЛБВ. На рис. 9 показана зависимость КПД giro-ЛБВ от питч-фактора.

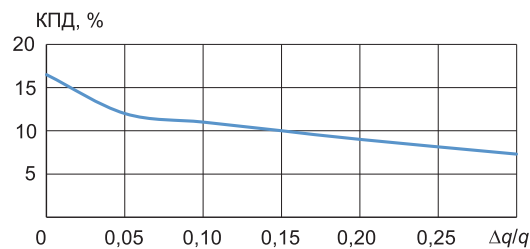


Рис. 9. Зависимость КПД giro-ЛБВ от питч-фактора
Fig. 9. The dependence of efficiency of the gyro-TWT on the pitch factor

Согласно рис. 9, КПД giro-ЛБВ изменяется от 17,0 до 7,5 % при увеличении углового разброса поперечных скоростей электронов до 30 %, что указывает на достаточную устойчивость giro-ЛБВ к начальному угловому разбросу электронов, который определяется конструкцией электронной магнетронной пушки. Распределение поперечных скоростей электронов по длине прибора при наличии начального углового их разброса показано на рис. 10.

Заключение

1. Гиро-ЛБВ на моде волны TE_{02} обеспечивает хорошие характеристики прибора по КПД (37 %), по полосе усиления (12,6 %) и коэффициенту усиления (41,7 дБ) при рабочей частоте 95 ГГц. Гиро-ЛБВ-умножитель частоты позволяет продвинуться в более высокий диапазон частот 190 ГГц при вполне приемлемых параметрах электронного потока, волновода и магнитостатического поля (КПД = 17 %, полоса усиления $\Delta f/f = 7,2$ %, коэффициент усиления 30 дБ).

2. Нормированный радиус волновода на входе в усилитель составлял 7,430 рад., а на выходе – 3,716 рад. Основные потери энергии высокочастотного поля в стенках волновода наблюдались в последней трети волновода, а диаметр волновода здесь был почти в два раза меньше, чем на входе усилителя. Это позволяет упростить систему охлаждения и реализовать ее только в последней секции волновода.

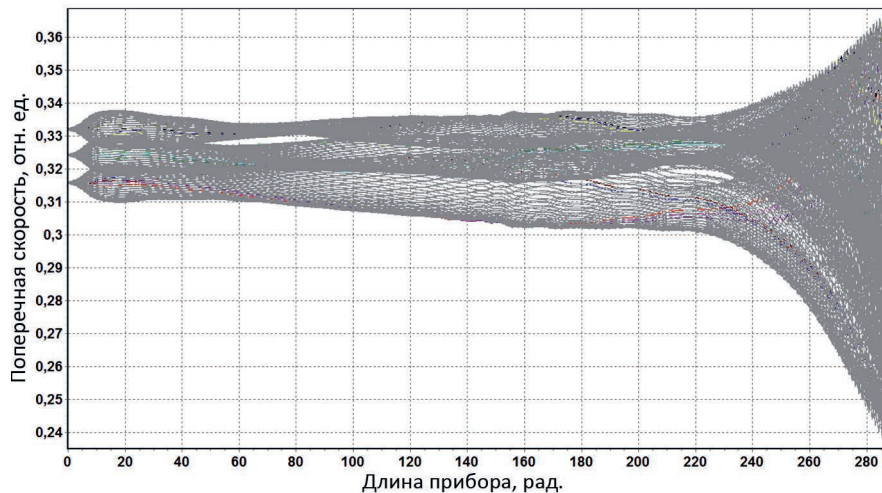


Рис. 10. Распределение поперечных скоростей электронов по длине прибора при наличии их начального углового разброса

Fig. 10. Distribution of transverse electron velocities along the length of the device in the presence of their initial angular distribution

Список литературы

1. Thumm, M. State-of-the-Art of High-Power Gyro-Devices / M. Thumm // *KIT Scientific Reports* 7761. 2021.
2. Kartikeyan, M. V. Gyrotrons: High Power Microwave and Millimeter Wave Technology / M. V. Kartikeyan, E. Borie, M. Thumm // *Gyrotrons*. Berlin/Heidelberg, Germany; NY, USA, 2003. P. 23–25.
3. Vacuum Electronic High Powerterahertz Sources / J. H. Booske [et al.] // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2011. Vol. 1. P. 54–75.
4. Nusinovich, G. S. The Gyrotron at 50: Historical Overview / G. S. Nusinovich, M. K. A. Thumm, M. I. Petelin // *J. Infr. Milli. Terahz. Waves*. 2014. Vol. 35. P. 325–381.
5. Characteristics and Applications of Fast-Wavegyrodevices / K. L. Felch [et al.] // *Proc. IEEE*. 1999. Vol. 87. P. 752–781.
6. A Quartercentury of Gyrotron Research and Development / V. L. Granatstein [et al.] // *IEEE Trans. PlasmaSci.* 1997. Vol. 25. P. 1322–1335.
7. Zapevalov, V. E. Evolution of the Gyrotrons. Radiophysics and Quantum Electronics / V. E. Zapevalov. 2012. Vol. 54, No 8–9. P. 507–518.
8. Design and Preliminary Experiment of W-Band Broadband TE₀₂ Mode Gyro-TWT / Xu Zeng [et al.] // *Electronics*. 2021. Vol. 10, No 16. P. 1950–1964.
9. Колосов, С. В. Компьютерная программа GYRO-K для разработки и проектирования гирорезонансных приборов СВЧ / С. В. Колосов, И. Е. Зайцева // *СВЧ-электроника*. 2017. № 2. С. 46–48.
10. Колосов, С. В. Оптимизация электронных приборов СВЧ с нерегулярными волноводами / С. В. Колосов // LAP LAMPERT Academic Publishing RU. 2018.
11. Свешников, А. Г. Возбуждение нерегулярных волноводов / А. Г. Свешников // *Научные доклады высшей школы. Серия: Физико-математические науки*. 1959. № 2. С. 162–165.
12. Свешников, А. Г. Нерегулярные волноводы / А. Г. Свешников // *Известия вузов СССР. Серия: Радиофизика*. 1959. Т. 2, № 5. С. 720–723.
13. Флетчер, К. Численные методы на основе метода Галеркина / К. Флетчер. М.: Мир, 1988.

References

1. Thumm M. (2021) State-of-the-Art of High-Power Gyro-Devices. *KIT Scientific Reports* 7761.
2. Kartikeyan M. V., Borie E., Thumm M. (2003) *Gyrotrons: High Power Microwave and Millimeter Wave Technology*. Springer Berlin/Heidelberg, Germany; NY, USA. 23–25.
3. Booske J. H., Dobbs R. J., Joye C. D., Kory C. L., Neil G. R., Park G. S., et al. (2011) Vacuum Electronic High Powerterahertz Sources. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 1, 54–75.
4. Nusinovich G. S., Thumm M. K. A., Petelin M. I. (2014) The Gyrotron at 50: Historical Overview. *J. Infr. Milli. Terahz. Waves*. 35, 325–381.
5. Felch K. L., Danly B. G., Jory H. R., Kreischer K. E., Lawson W., Levush B., et al. (1999) Characteristics and Applications of Fast-Wavegyrodevices. *Proc. IEEE*. 87, 752–781.

6. Granatstein V. L., Levush B., Danly B. G., Parker R. K. (1997) A Quartercentury of Gyrotron Research and Development. *IEEE Trans. PlasmaSci.* 25, 1322–1335.
7. Zapevalov V. E. (2012) Evolution of the Gyrotrons. *Radiophysics and Quantum Electronics.* 54 (8–9), 507–518.
8. Xu Zeng, Chaohai Du, An Li, Shang Gao, Zheyuan Wang, Yichi Zhang, et al. (2021) Design and Preliminary Experiment of W-Band Broadband TE₀₂ Mode Gyro-TWT. *Electronics.* 10 (16), 1950–1964.
9. Kolosov S. V., Zaitseva I. E. (2017) Computer Program GYRO-K for the Development and Design of Gyroresonant Microwave Devices. *SHF-Electronics.* (2), 46–48 (in Russian).
10. Kolosov S. V. (2018) Optimization of Microwave Electronic Devices with Irregular Waveguides. *LAP LAMPERT Academic Publishing RU* (in Russian).
11. Sveshnikov A. G. (1959) Excitation of Irregular Waveguides. *Scientific Reports of Higher School, Ser. Physical and Mathematical Sciences.* (2), 162–165 (in Russian).
12. Sveshnikov A. G. (1959) Irregular Waveguides. *News of Universities of the USSR. Series: Radiophysics.* 2 (5), 720–723 (in Russian).
13. Fletcher K. (1988) *Numerical Methods Based on the Galerkin Method.* Moscow, Mir Publ. (in Russian).

Вклад авторов

Колосов С. В. поставил задачу по расчету оптимальной конструкции gyro-ЛБВ-умножителя частоты в области миллиметрового диапазона длин волн.

Шатилова О. О. произвела расчеты оптимальной конструкции gyro-ЛБВ-умножителя частоты в области миллиметрового диапазона длин волн, которые позволили достичь следующих параметров усилителя: КПД = 17 %, полоса усиления $\Delta f/f = 7,2$ %, коэффициент усиления 30 дБ.

Authors' contribution

Kolosov S. V. set the task of calculating the optimal design of a gyro-TWT – a frequency multiplier in the millimeter wavelength range.

Shatilova O. O. made calculations of the optimal design of a gyro-TWT – a frequency multiplier in the millimeter wavelength range, which made it possible to achieve the following amplifier parameters: efficiency 17 %, gain band $\Delta f/f = 7.2$ %, gain 30 dB.

Сведения об авторах

Колосов С. В., д-р физ.-мат. наук, проф. каф. вычислительных методов и программирования, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Шатилова О. О., ст. преп. каф. вычислительных методов и программирования, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 571-25-30
E-mail: kolosov@bsuir.by
Колосов Станислав Васильевич

Information about the authors

Kolosov S. V., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor at the Department of Computational Methods and Programming, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Shatilova O. O., Senior Lecturer at the Department of Computational Methods and Programming, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 571-25-30
E-mail: kolosov@bsuir.by
Kolosov Stanislav Vasil'evich