

УДК 621.396.61

ТРЕХМЕРНЫЙ РАСЧЕТ ГИРО-ЛБВ КА-ДИАПАЗОНА С МОЩНОСТЬЮ ДО 10 КВТ ОТ КАТОДА ДО КОНЦА ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

С. В. Самсонов¹, Г. Г. Денисов^{1,2}, С. В. Мишакин¹

¹ Институт прикладной физики Российской академии наук,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

Статья поступила в редакцию 2 ноября 2017 г.

Аннотация. Представлены результаты теоретического анализа giro-ЛБВ со спирально-гофрированным волноводом 10-мм диапазона длин волн. Особенности данного варианта giro-ЛБВ являются использование только одного барьерного диэлектрическое окна (как для ввода, так и для вывода СВЧ излучения), «теплого» магнита с потреблением мощности около 15 кВт, а также относительно низковольтного (25 кВ*2 А) непрерывного источника питания. Конструкция такого усилителя и технология его изготовления мало отличаются от т.н. технологических гиротронов-генераторов, которые являются надежными приборами и используются во многих приложениях. Впервые выполнено 3-мерное «полностью электромагнитное» компьютерное моделирование наиболее важной части прибора от эмиттера электронного пучка до существенного спада продольного магнитного поля, ограничивающего область электронно-волнового взаимодействия.

Ключевые слова: прибор гиротронного типа, гиротронная лампа бегущей волны, giro-ЛБВ, giro-ЛБВ со спирально-гофрированным волноводом, 3-мерный расчет на основе конечно-разностного алгоритма во временной области и метода частица-в-ячейке.

Abstract. Results of theoretical analysis of a Gyro-TWT with helically corrugated waveguide of 10-mm wavelength range are presented. The peculiarities of the presented Gyro-TWT variety are the use of a single barrier dielectric window (both for input and output of the microwave radiation), “warm” magnet with a power

consumption of about 15 kW, as well as a relatively low-voltage (25 kV*2 A) DC power supply. Construction and technology of the manufacturing of such an amplifier appear to be quite similar to those of so-called technological gyrotron-oscillators that are reliable devices and used for numerous applications. 3D full electromagnetic computer modeling of the most important part of the device starting from the emitter of an electron beam and ending by significant downturn of the axial magnetic field bordering the beam-wave interaction space was performed for the first time. At the input power in the range of 10-50 W, the gyro-TWT was simulated to yield the output power of about 10 kW at the instantaneous bandwidth of 1 GHz or 3-5 kW at the bandwidth of 2 GHz depending on the tuning of the static magnetic field. The system was analyzed with respect to the most expected 3D imperfection in the form of the cathode axis radial shift. It was found that the critical axis shift amounted to about 0.5 mm at which the bandwidth was significantly reduced and the amplifier could start to oscillate.

Key words: gyrotron-type device, gyrotron travelling-wave tube, gyro-TWT, gyro-TWT with helically corrugated waveguide, 3D Finite-Difference Time-Domain Particle-in-Cell (FDTD PIC) simulations.

1. Введение

Гиротронная лампа бегущей волны (гиро-ЛБВ) является широкополосной разновидностью гиротронных усилителей, открывающих возможность получения импульсного или непрерывного излучения в миллиметровом диапазоне длин волн с мощностью на 1-2 порядка превосходящей мощность «обычных» ЛБВ с замедляющими структурами и прямолинейными пучками [1-13]. Наряду с другими различными вариантами реализации gyro-ЛБВ [2-8], в течение последних 20 лет достаточно активно и успешно развивается концепция gyro-ЛБВ на основе волноводов с винтовой гофрировкой поверхности [9-13]. Радикальное изменение дисперсии одной из волн круглого волновода, обеспечиваемое такой гофрировкой, позволяет существенно расширить полосу усиления, повысить электронный КПД и устойчивость

усилителя при использовании электронных пучков с достаточно большим скоростным разбросом [9].

К настоящему времени научной группой ИПФ РАН в сотрудничестве с ЗАО НПП «Гиком» реализовано несколько образцов таких giro-ЛБВ, обеспечивающих в Ka-диапазоне уровень импульсной мощности до 150 кВт, непрерывной и средней мощности до 10 кВт при ширине полосы усиления 1-3 ГГц [11-13]. Сравнительно недавно предложено и испытано в экспериментах устройство, позволяющее вводить в giro-ЛБВ входной сигнал не через стандартный одномодовый волновод и специальный узел с диэлектрическим окном с характерными размерами меньше или порядка длины волны, а через единственное сверхразмерное (диаметром в несколько раз превышающем длину волны) окно, используемое при этом как для ввода, так и для вывода СВЧ мощности [14, 15]. Данное обстоятельство наряду с очевидным повышением перспектив продвижения усилителя в коротковолновую часть миллиметрового диапазона существенно упрощает конструкцию прибора, что в совокупности с возможностью использования несверхпроводящих магнитов для работы в Ka-диапазоне, делает конструкцию прибора аналогичной конструкции т.н. технологических гиротронов. Отметим, что такие гиротроны, обеспечивающие непрерывную мощность от нескольких до десятков киловатт в длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн, как правило, являются очень надежными устройствами и годами работают в десятках технологических и исследовательских установок по всему миру [16-18].

В данной статье представлены результаты разработки «технологической» giro-ЛБВ 10-мм диапазона длин волн, которая по простоте изготовления и режимам работы практически не отличается от соответствующих гиротронов, но в отличие от последних обеспечивает качественно новое свойство в виде возможности усиления достаточно широкополосных сигналов. Благодаря развитию средств программного обеспечения и компьютерных ресурсов, оказалось возможным достаточно адекватное «прямое» 3-мерное моделирование работы прибора, причем численная модель данной giro-ЛБВ

включает не только область рабочего электронно-волнового взаимодействия, но и область формирования электронного пучка, начиная с вылета частиц с поверхности эмиттера.

2. Особенности giro-ЛБВ и компьютерной модели

Основными особенностями разработанной конфигурации является пониженное рабочее напряжение (25 кВ), отсутствие «внутреннего» узла ввода, включающего обычно диэлектрическое входное окно и использование «теплого» соленоида с потреблением мощности около 15 кВт за счет работы giro-ЛБВ на второй гармонике циклотронной частоты при относительно небольшом магнитном поле около 0.57 Тл. Ввод усиливаемого сигнала в данном случае будет осуществляться с помощью внешней квазиоптической системы, включающей в себя разделитель входного и выходного потоков мощности, имеющих ортогональные поляризации вектора электрического поля [14].

В 3-мерной компьютерной модели (рис. 1) сигнал вводится через входной/выходной порт в виде горизонтально поляризованной $TE_{1,1}$ моды, а благодаря поляризатору, закритическому отражателю и селективным свойствам giro-ЛБВ с винтовым волноводом, выводится в виде вертикально поляризованной $TE_{1,1}$ моды. При этом для ввода/вывода СВЧ мощности и изоляции вакуумного объема прибора, может использоваться только одно окно достаточно большого диаметра. Окончательный расчет системы осуществлялся с помощью программного продукта CST Particle Studio (PIC Solver), входящего в пакет CST STUDIO SUITE [19]. Вследствие относительно небольших размеров системы удастся с достаточной точностью рассчитать область взаимодействия, начиная от вылета электронов с эмитирующего пояса на катоде до существенного спада магнитного поля на конце участка взаимодействия. Не включенными в данную модель остается только коллектор электронного пучка, заканчивающийся выходным окном достаточно большого диаметра. Область коллектора, занимающая в несколько раз больший по

сравнению представленным на рисунке 1 объем, достаточно адекватно рассчитывается на основе упрощенного траекторного анализа и практически не влияет основные электронно-волновые процессы, происходящие в данной гиро-ЛБВ.

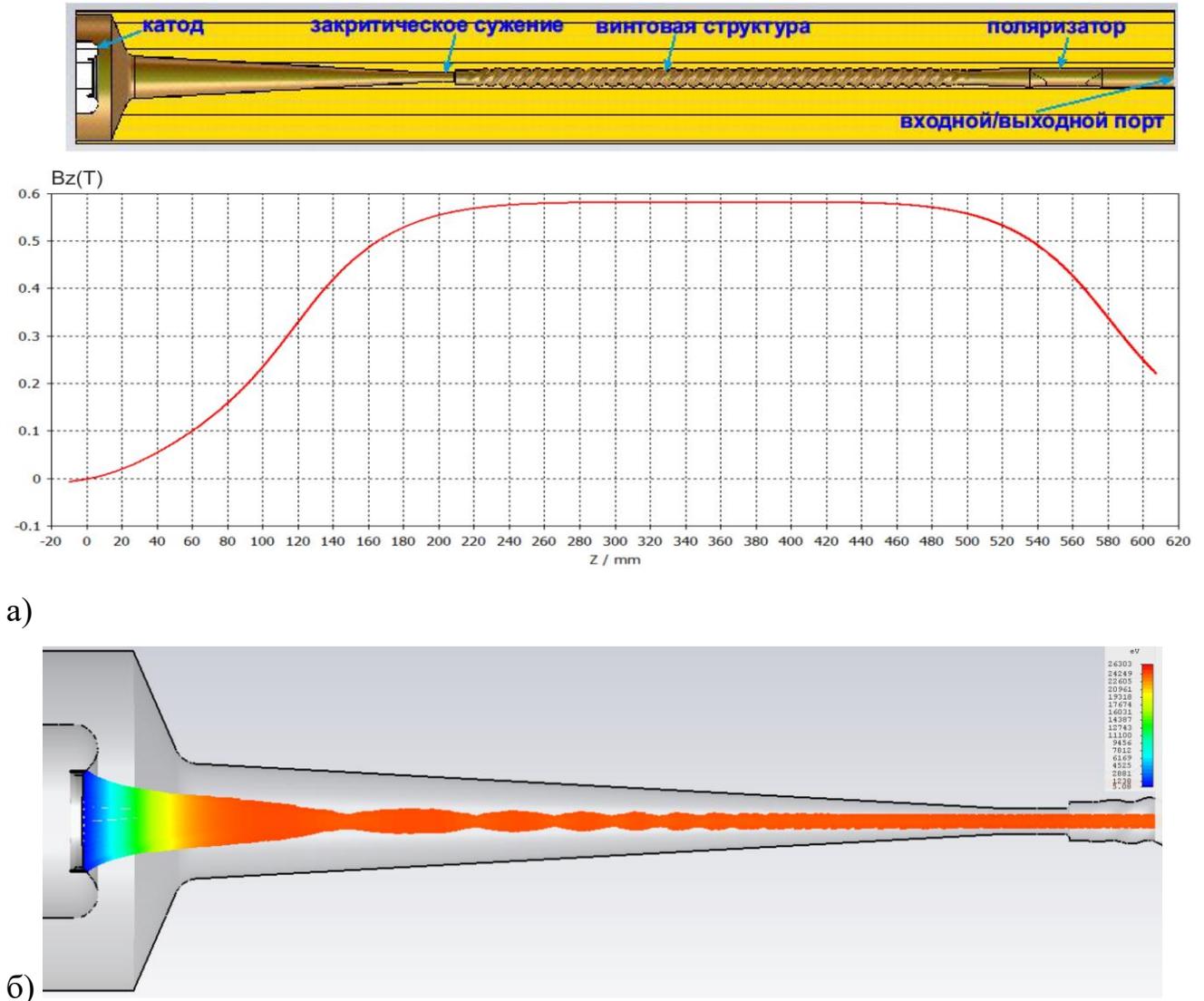


Рис.1. Компьютерная модель гиро-ЛБВ: а) полная геометрия системы и распределение магнитостатического поля, задаваемого основным соленоидом и катодной катушкой; б) траектории частиц в области пушки (цвет от синего к красному соответствует энергии электронов от 0 до 25 кэВ).

3. Результаты расчетов

Основные параметры внутренней геометрии системы и токи в обмотках электромагнитов были выбраны на основе расчетов с использованием упрощенных моделей электронно-волнового взаимодействия и траекторного

анализа. Согласно такого анализа, синтезированная для данного случая электронная пушка формирует пучок с энергией частиц 25 кэВ, током 2 А, питч-фактором около 1 и разбросом по поперечным скоростям около 10% (среднеквадратичное значение) на входе в пространство взаимодействия. При этом винтовая гиро-ЛБВ, согласно расчетам по упрощенной модели, должна обеспечивать электронный КПД до 20% при ширине полосы 5-7% и коэффициенте усиления 23-25 дБ.

«Полностью электромагнитная» модель использовалась на заключительном этапе теоретического анализа. При этом для ускорения расчетов (характерное число ячеек составляло 30-50 млн., число частиц 3-5 млн., скорость расчета около 5-10 нс/час при использовании опции распараллеливания вычислений на несколько десятков процессоров т.н. графических ускорителей) большинство из них проводилось с использованием входного сигнала с достаточно быстрой частотной модуляцией (линейным свипированием частоты), что позволяло за один «прогон» получать полную частотную характеристику системы. На основе ряда предварительных тестов (рис. 2) был выбран темп свипирования частоты входного сигнала для получения адекватных сглаженных частотных характеристик (рис. 3).

В результате такого «прямого» численного моделирования была, во-первых, подтверждена адекватность использования упрощенных моделей для описания рабочих режимов прибора – наиболее важные параметры электронного пучка и выходные параметры СВЧ излучения находились в хорошем соответствии. Кроме того некоторые внешние параметры, такие как величина магнитного поля в области взаимодействия и на катоде, ток электронного пучка, а также ряд геометрических параметров (средний радиус рабочего волновода, период и глубина гофрировки) были дополнительно оптимизированы.

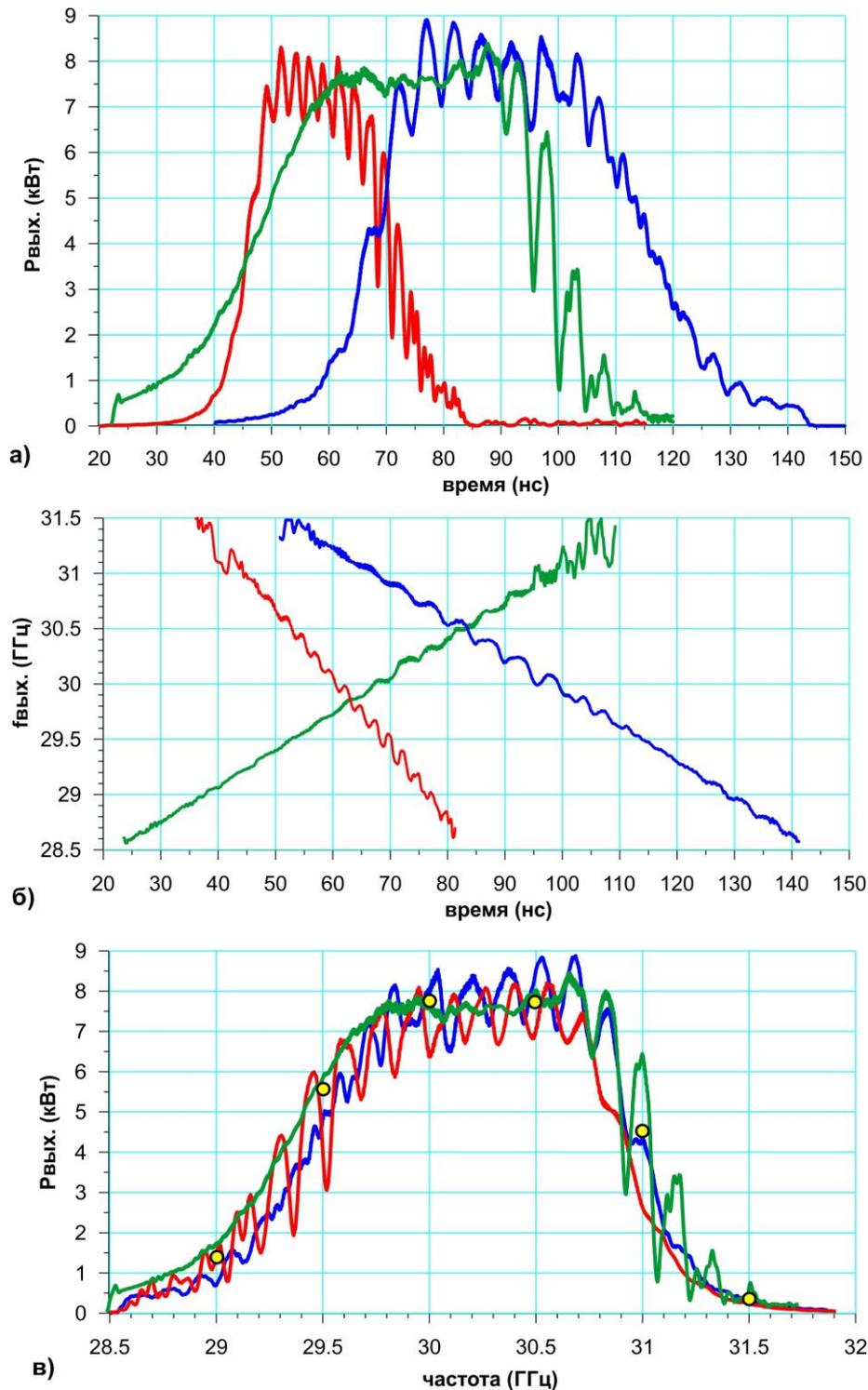


Рис. 2. Результаты расчетов, иллюстрирующие использование входного сигнала с линейной частотной модуляцией для получения частотной выходной характеристики gyro-ЛБВ: временные зависимости выходной мощности (а) и частоты (б) при входном сигнале с линейно-убывающей от 32.5 до 28.5 ГГц в течение 60 нс (красный) и 120 нс (синий) частотой, и линейно-нарастающей в течение 120 нс частотой (зеленый); в) соответствующие частотные зависимости (желтыми точками показаны результаты расчета при задании входного сигнала на фиксированной частоте, время установления стационарного выходного сигнала на разных частотах составляло от 10 до 20 нс при запаздывании около 10 нс).

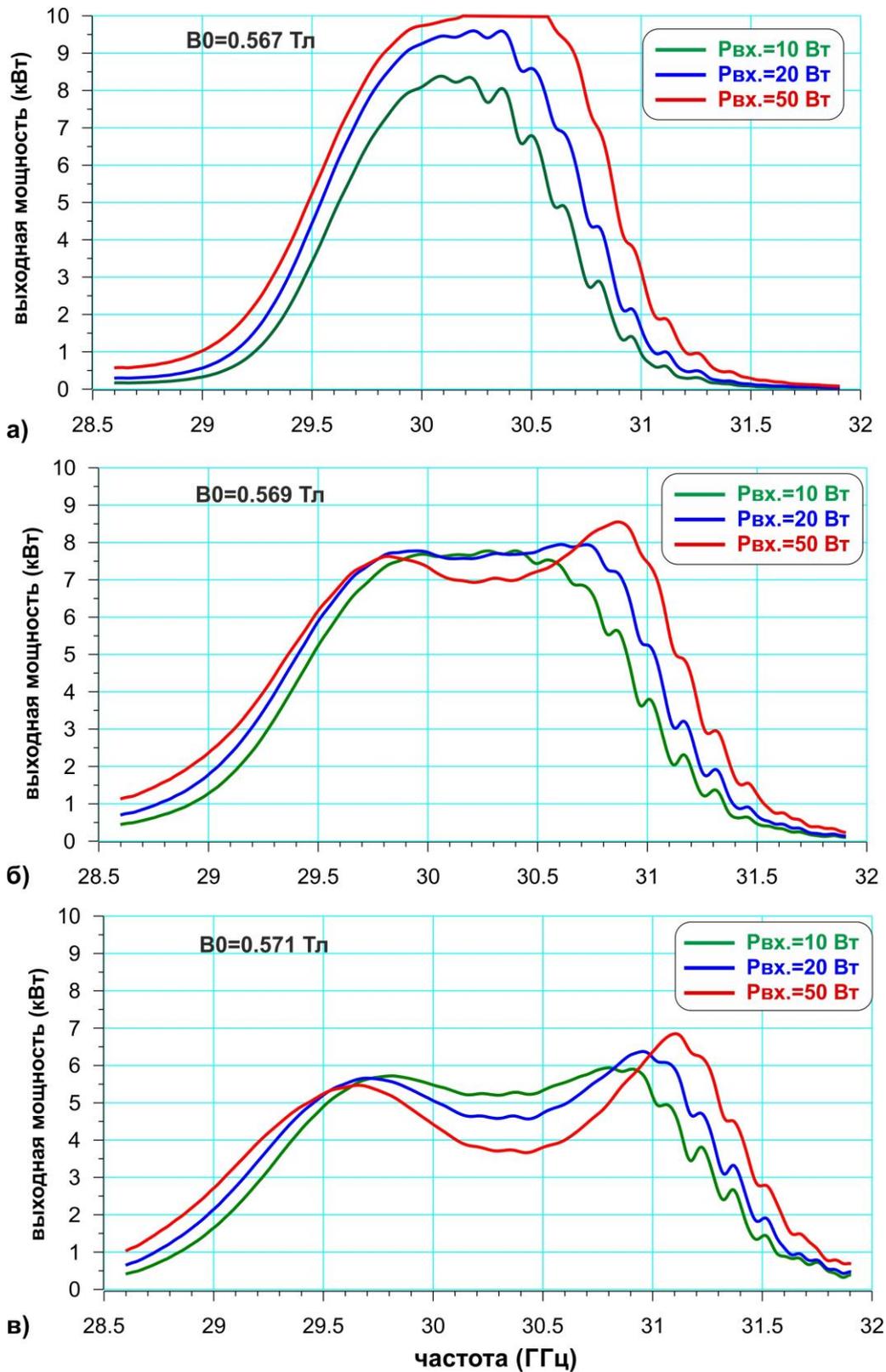


Рис. 3. Частотные характеристики гиро-ЛБВ при различных значениях магнитного поля B_0 и мощности входного сигнала $P_{вх.}$, полученные при расчете свипированного по частоте входного сигнала.

В отличие от упрощенных моделей, достаточно важным эффектом, наблюдаемым в ряде случаев в таких численных «экспериментах», являлось самовозбуждение системы в отсутствие внешнего сигнала при превышении тока пучка или вращательной скорости частиц некоторых пороговых значений (вращательная скорость или питч-фактор электронов могли в широких пределах варьироваться небольшим изменением тока дополнительной катушки, расположенной в области катода). Такое самовозбуждение, наблюдаемое и в большинстве реальных экспериментов с гиро-ЛБВ, как правило, возникает на частоте, лежащей в рабочей полосе усиления и обусловлено наличием определенного уровня обратной связи в данной системе, возникающей из-за различного рода неоднородностей электродинамической системы. Вполне ожидаемым оказалось, что такие пороговые паразитные эффекты, возникающие при компьютерном моделировании, существенно зависели от размеров элементарных численных ячеек. В данном случае используемые компьютерные ресурсы позволяли обеспечивать минимальные размеры ячеек в области, занимаемой винтовой структурой, вплоть до 0.25 мм по поперечной и 0.4 мм по продольной координатам, что, по результатам различных дополнительных тестов, обеспечивало достаточное для практической реализации соответствие данных расчетов реальной физической ситуации.

Еще одним важным результатом данной работы является то, что благодаря использованию полностью 3-мерной компьютерной модели, включающей в себя близкий к реальности источник электронного пучка, удалось промоделировать ситуации с нарушением осевой симметрии системы. В частности были проведены наиболее актуальные для анализа практической реализации расчеты, в которых ось катода была параллельно смещена относительно оси магнитного поля и остальной части системы. Данное моделирование показало, что критическое смещение катода составляет около 0.5 мм. При этом средний питч-фактор частиц практически не меняется, но скоростной разброс существенно возрастает (в 1.5 раза - среднеквадратичное значение и почти в 2 раза (до 65%) по ширине функции распределения на

уровне 0.1), что приводит, во-первых, к заметному сужению полосы усиления, а, во-вторых, к самовозбуждению системы, обусловленному значительной долей частиц с очень большими питч-факторами (рис. 4).

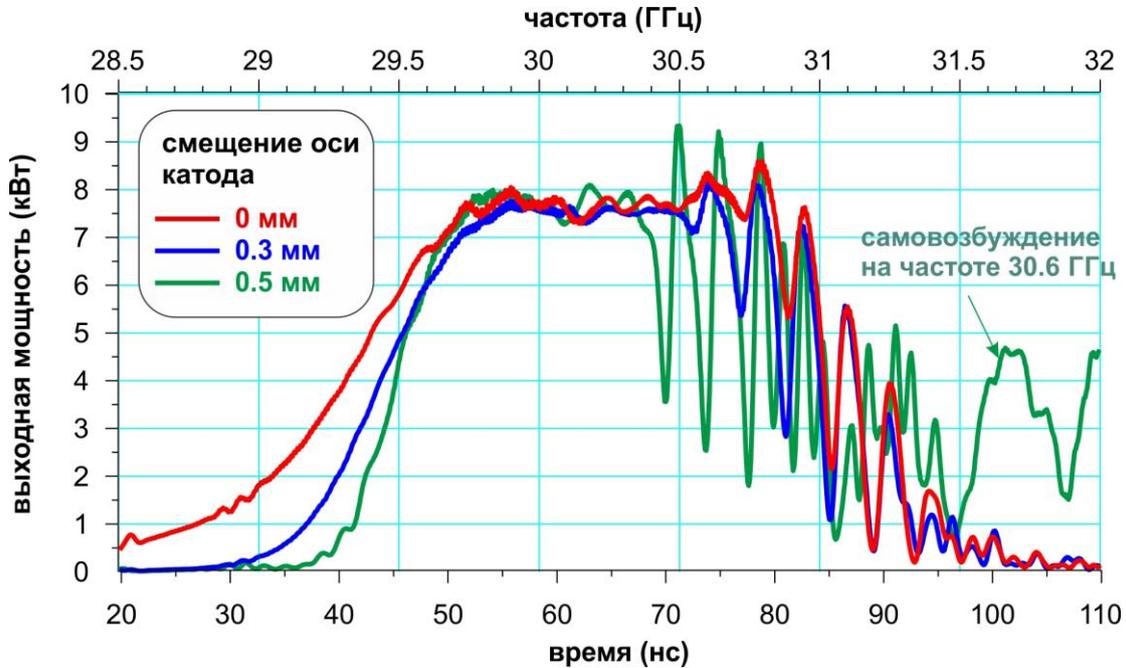


Рис. 4. Расчетные зависимости выходной мощности giro-ЛБВ от времени при запитке ЛЧМ входным сигналом и различных смещениях катода относительно оси системы (сверху показана соответствующая частотная шкала).

5. Заключение

В результате теоретического анализа определена конфигурация и выходные характеристики giro-ЛБВ со спирально-гофрированным волноводом 10-мм диапазона длин волн. В разработанном варианте, также как и в типичных технологических гиротронах, используется только одно барьерное диэлектрическое окно, может быть использован «теплый» магнит с потреблением мощности около 15 кВт, а также относительно низковольтный (25кВ*2А) непрерывный источник питания. При входной мощности в диапазоне 10-50 Вт данная giro-ЛБВ может обеспечить выходную мощность около 10 кВт при полосе усиления 1 ГГц или 3-5 кВт при полосе около 2 ГГц в зависимости от настройки магнитного поля. Выполнено 3-мерное компьютерное моделирование прибора целиком (за исключением коллекторной

области), определен ряд требований к соосности элементов системы. Представленный вариант усилителя может оказаться востребованным в системах телекоммуникации, а также для различных высокотехнологичных приложений, в которых в настоящее время используются гиротроны, например, в установках по спеканию керамики и различного рода модификации материалов.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2014-2017 годы (тема № 0035-2014-0023).

Литература

1. Гапонов А.В. Возбуждение линии передачи непрямолинейным электронным пучком. // Изв. вузов. Радиофизика. 1959. Т. 2, № 3. С. 443-450.
2. K.R. Chu, H.Y. Chen, C.L. Hung, T.H. Chang, and L.R. Barnett, Ultrahigh gain gyrotron traveling wave amplifier // *Phys. Rev. Lett.*, 1998, vol. 81, no. 21, pp. 4760–4763.
3. M. Garven, J.P. Calame, B.G. Danly et al. A gyrotron-travelling-wave tube amplifier experiment with a ceramic loaded interaction region // *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2002. vol.30, no.3, pp. 885-893.
4. D.E. Pershing, K.T. Nguyen, J.P. Calame et al. A TE₁₁ Ka-band Gyro-TWT amplifier with high-average power compatible distributed loss // *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2004, vol.32, no.3, pp. 947-956.
5. H. Wang, H. Li, Y. Luo, R. Yan Theoretical and experimental investigation of a Ka-band Gyro-TWT with lossy interaction structure // *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, 2011, vol. 32, no. 2, pp. 172–185.
6. E.F. Wang, X. Zeng, B.T. Liu et al. Experimental study of 290 kW Ka-band gyrotron-traveling wave-tube // *Proc. 13th IEEE Int. Vacuum Electronics Conference and 9th IEEE Int. Vacuum Electron Sources Conference (IVEC-IVESC 2012)*, Monterey, CA, USA, pp. 215-216.

7. M. Blank, P. Borchard, S. Cauffman, F. Felch, W-band gyro-amplifiers at Haystack Ultra-Wide Satellite Imaging Radar // Digest of Joint 32nd Int. Conf. on Infrared and Millim. Waves and 15th Int. Conf. on THz Electronics, Cardiff, UK, 2007, pp.364-366.
8. J.R. Sirigiri, M.A. Shapiro, and R.J. Temkin, High-power 140-GHz quasioptical gyrotron traveling-wave amplifier, Phys. Rev. Lett., 2003, vol. 90, p. 258302.
9. G.G. Denisov, V.L. Bratman, A.D.R. Phelps, S.V. Samsonov Gyro-TWT with a Helical Operating Waveguide: New Possibilities to Enhance Efficiency and Frequency Bandwidth // IEEE Trans. on Plasma Science, 1998, vol.26, no.3, pp.508-518.
10. Братман В.Л., Денисов Г.Г., Самсонов С.В. и др. Высокоэффективные широкополосные гиро-ЛБВ и гиро-ЛОВ со спирально-гофрированными волноводами. // Известия вузов. Радиофизика, 2007, т.50, №2, с.104-116.
11. S.V. Samsonov, G.G. Denisov, I.G. Gachev, et al. CW Ka-band kW-level Helical-Waveguide Gyro-TWT // IEEE Trans. on Electron Devices, 2012, vol. 59, no. 8, pp. 2250 – 2255.
12. Самсонов С.В., Гачев И.Г., Денисов Г.Г., Богдашов А.А., Мишакин С.В., Фикс А.Ш., Солуянова Е.А., Тай Е.М., Доминюк Я.В., Мурзин В.Н., Левитан Б.А. Широкополосная импульсная гиро-ЛБВ Ка-диапазона на основе волновода с винтовой гофрировкой // Радиотехника. 2014. №4. С.104-112.
13. S.V. Samsonov, I.G. Gachev, G.G. Denisov, A.A. Bogdashov, S.V. Mishakin, A.S. Fiks, E.A. Soluyanov, E.M. Tai, Y.V. Dominyuk, B.A. Levitan, V.N. Murzin "Ka-band Gyrotron Traveling-Wave Tubes with the Highest Continuous-Wave and Average Power," IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, vol.61, no.12, pp.4264-4268.
14. Денисов Г.Г., Богдашов А.А., Гачев И.Г., Мишакин С.В., Самсонов С.В. Новые системы ввода-вывода излучения для гиро-ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн // Известия вузов. Радиофизика. 2015. Т.58. №10. С.857-866.

15. S.V. Samsonov, A.A. Bogdashov, G.G. Denisov, I.G. Gachev, S.V. Mishakin, "Proof-of-Principle Experiment on High-Power Gyrotron Traveling-Wave Tube with a Microwave System for Driving and Extracting Power Through One Window", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016, vol.26, no.4, pp.288-290.
16. Yu. Bykov, A. Eremeev, G.G. Denisov, et al. 24-84 GHz Gyrotron Systems for Technological Microwave Applications, IEEE Transactions on Plasma Science, vol.32, no.1, 2004, pp.67-72.
17. Kikunaga T., Asano H., Hemmi K., Sato F., Tsukamoto T., A 28 GHz gyrotron with a permanent magnet system. Conf. Digest 20th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, 1995, Lake Buena Vista (Orlando), Florida, 485-486.
18. Malygin A., Illy S., Pagonakis I., Avramidis K., Thumm M., Jelonnek J., Ives L., Collins G., Experimental investigations of a 15 kW/28 GHz second harmonic CW gyrotron designed for evaluation of new emitter technologies. Proc. 9th Int. Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications", July 24-30, 2014, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 162-163.
19. CST Particle Studio Overview. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cst.com/Products/CSTPS> (дата обращения 01.11.2017).

Ссылка на статью:

С. В. Самсонов, Г. Г. Денисов, С. В. Мишакин. Трехмерный расчет гиро-ЛБВ Ka-диапазона с мощностью до 10 кВт от катода до конца области взаимодействия. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov17/10/text.pdf>