

Особенности работы гиротронов с обращенным выводом энергии

Представлены результаты численных исследований гиротронов с выводом излучения в сторону катода. Такая конфигурация гиротрона является привлекательной в плане перестройки частоты, а также с точки зрения реализации мощного импульсного источника излучения, работающего на эффекте кооперации двух низших продольных мод резонатора.

Ключевые слова: Гиротрон, перестройка частоты, импульсная генерация.

Нетипичная конфигурация гиротрона (рис. 1), при которой вывод излучения осуществляется в сторону катодного конца резонатора [1-2], хотя и заметно сложнее с точки зрения реализации, однако обладает некоторыми преимуществами перед гиротронами с традиционным выводом излучения в сторону коллектора в плане реализации частотно-перестраиваемых источников на основе гироприборов средней мощности, а также в плане реализации импульсных источников излучения терагерцового частотного диапазона с высокой пиковой мощностью.

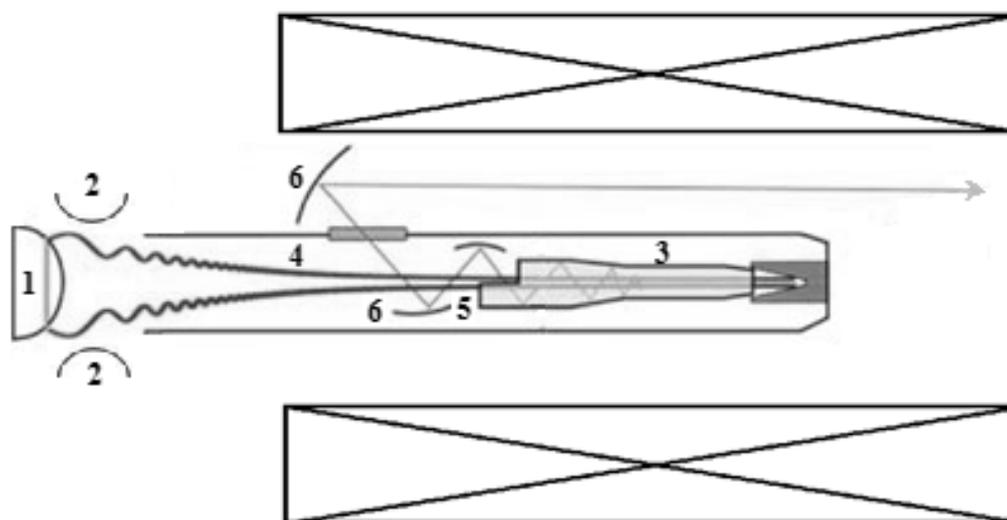


Рис. 1. Схема гиротрона с выводом излучения в сторону катодного конца. 1–катод, 2–анод, 3–резонатор, 4–траектория электронного пучка, 5–волновой преобразователь, 6–зеркала квазиоптического модового преобразователя.

В гиротроне с низким ускоряющим напряжением возможна эффективная работа на высоких продольных модах [3]. Этот эффект может быть использован для непрерывной перестройки частоты в гироприборах средней мощности. Однако для традиционной конфигурации резонатора с выводом излучения в сторону коллектора выходная мощность сильно изменяется с изменением магнитного поля. КПД гиротрона в режиме лампы

обратной волны (ЛОВ), предпочтительного с точки зрения перестройки частоты, значительно ниже, чем в режиме лампы бегущей волны (ЛБВ) из-за омических потерь и отражения обратной волны. Эти трудности могут быть преодолены использованием конфигурации гиротрона с выводом мощности в сторону катодного конца. Моделирование на основе усредненных уравнений одномодового нестационарного гиротрона [6], проверенное прямым трехмерным РЭС-моделированием, показывает, что в гиротроне с напряжением 2 кВ и током 150 мА [1] выходная мощность излучения может составлять от 15 до 30 Вт с КПД 5-10 % в полосе шириной 3 ГГц (рис. 2) [4], причем перепад выходной мощности во всей полосе составляет менее двух раз. При повышении напряжения до 10 кВ выходная мощность излучения может составлять от 50 до 130 Вт в полосе шириной 2,5 ГГц (рис. 3). Такие характеристики являются привлекательными с точки зрения ДПЯ/ЯМР спектроскопии и некоторых других приложений.

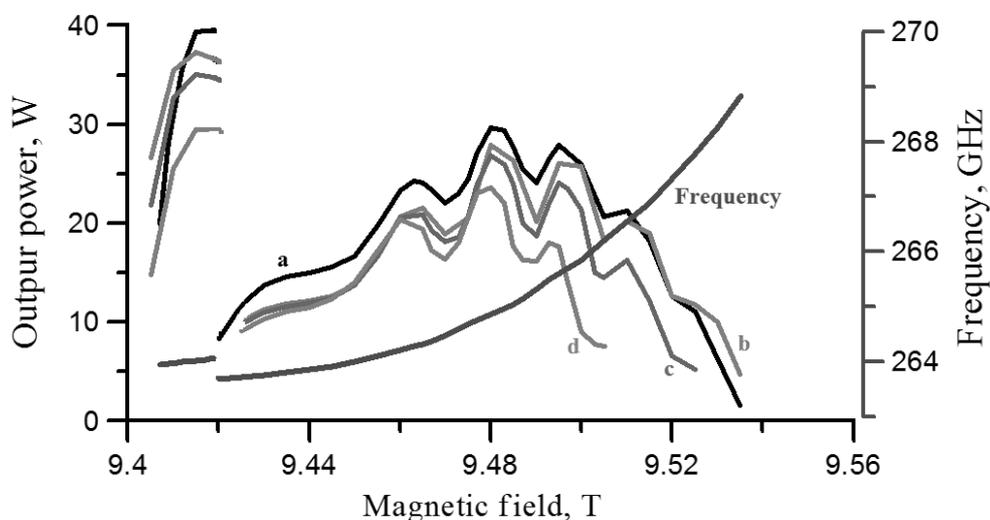


Рис. 2. Зависимость мощности и частоты (отмечено «Frequency») от величины рабочего магнитного поля для гиротрона с выводом излучения в сторону катода при разбросе по поперечным скоростям 0% (a), 5% (b), 20% (c), 35% (d). Слева показана рабочая область для режима ЛБВ.

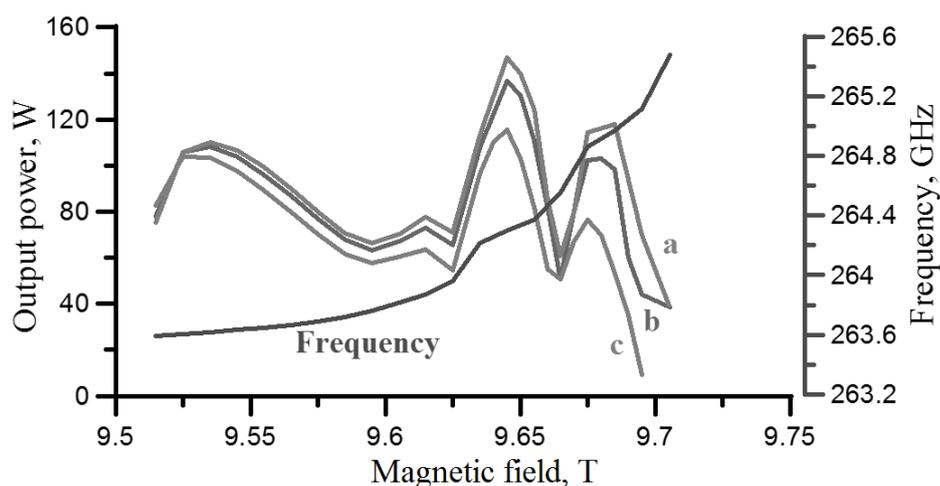


Рис. 3. Зависимость мощности и частоты (отмечено «Frequency») от величины рабочего магнитного поля для гиротрона на 10 кВ с выводом излучения в сторону катода при разбросе по поперечным скоростям 5% (a), 20% (b), 35% (c).

Кроме того, обращенная конфигурация резонатора привлекательна с точки зрения реализации мощных импульсных источников излучения. Направление вывода излучения значительно влияет на переходный процесс возбуждения гиротрона в случае значительного превышения стартового тока над порогом возбуждения. При пониженных магнитных полях, далеких от резонансного для низшей продольной моды резонатора, но близких к резонансному для второй продольной моды, процесс возбуждения характеризуется их последовательным возбуждением. В работе [7] показано, что компрессия такого двухволнового сигнала в выходной секции, обеспечивающей подходящую частотную дисперсию групповой скорости, может быть способом генерации мощных импульсов, для которых отношение «мощность излучения» / «мощность электронного потока» достигает единицы. Режим кооперации двух низших продольных мод может быть реализован также в гиротроне с выводом излучения в направлении катода без использования специальной выходной секции, но при высоких токах пучка. Такие сложные двухволновые режимы могут обеспечивать генерацию коротких импульсов излучения с высокой пиковой мощностью.

Импульсы высокой мощности формируются за счет правильного сложения сигналов двух разных мод на выходе катодного конца резонатора. Сначала возбуждается вторая продольная мода, но она поступает на катодный выходной конец резонатора только после ее отражения от закритического сужения на коллекторном конце (рис.4). В то же время низшая продольная мода, которая возбуждается позже, приходит в выходную секцию резонатора с меньшей групповой скоростью. В результате две волны, возбуждаемые в разное время переходного процесса возбуждения, образуют один мощный ВЧ-импульс.

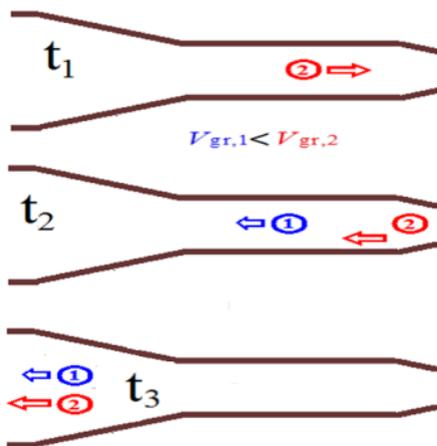


Рис. 4. Динамика движения первой и второй продольных мод в рабочем резонаторе.

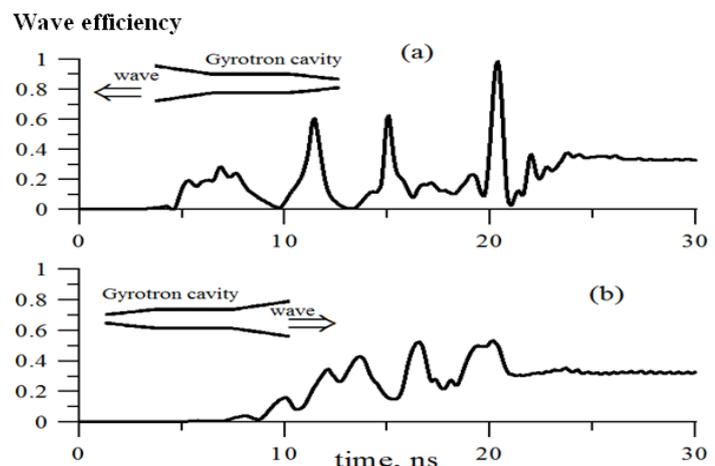


Рис. 5. Динамика возбуждения гиротрона с обращенным (a) и традиционным (b) выводом излучения. Показана зависимость нормированной мощности излучения от времени.

Возможность реализации такого двухмодового режима численно исследовалась на примере конкретной установки – экспериментально реализованного в ИПФ РАН импульсного гиротрона на первой гармонике с частотой 0.67 ГГц [5]. Данный гиротрон работал на моде $TE_{31,8}$, возбуждаемой на основном циклотронном резонансе. В квазистационарном длинноимпульсном (10-20 мс) режиме мощность излучения составляла 200 кВт при токе пучка 15 А, что соответствовало КПД 20%. В соответствии с результатами моделирования на основе нестационарных уравнений для медленной комплексной амплитуды $TE_{m,p}$ -моды [6], при высоких (в 2-3 раза выше стартового) токах пучка в случае вывода излучения в сторону катода в этом гиротроне возможна генерация импульсов

излучения, мощность которых достигает и даже превышает мощность рабочего электронного потока (рис. 5).

Работа поддержана грантом РФФИ 18-32-00772 мол_а.

Библиографический список

1. V.L. Bratman, A.E. Fedotov, Yu.K. Kalynov, P.B. Makhalov, I.V. Osharin, Numerical Study of a Low-Voltage Gyrotron ("Gyrotrino") for DNP/NMR Spectroscopy, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, no. 4, 2017..
2. V. E. Zapevalov et al., "Development of 395 GHz gyrotrons for DNP spectroscopy on the basis of experience of elaboration of a 260 GHz gyrotron," in Proc. 8th Int. Workshop Strong Microw. Terahertz Waves, Sour. Appl. (SMP), Nizhny Novgorod–St. Petersburg, Russia, Jul. 2011, pp. 143–144.
3. I.V. Bandurkin, V.L. Bratman, A.E. Fedotov, Yu.K. Kalynov, I.V. Osharin, A.V. Savilov, N.A. Zavolsky, Efficient excitation of high axial modes in simulations of low-voltage gyrotron, IVEC 2017 – 18th International Vacuum Electronics Conference» London, 2017.
4. V. L. Bratman, A. E. Fedotov, Yu. K. Kalynov, I. V. Osharin, and N. A. Zavolsky, Smooth Wideband Frequency Tuning in Low-Voltage Gyrotron With Cathode-End Power Output, IEEE Transactions on Electron Devices (Volume: 64, Issue: 12, Dec. 2017)..
5. Glyavin, M.Yu., Luchinin, A.G., Nusinovich, G.S., Rodgers, J., Kashyn, D.G., Romero-Talamas, C.A., Pu, R. A 670 GHz gyrotron with record power and efficiency (2012) Applied Physics Letters, 101 (15), 153503
6. Ginzburg, N.S., Nusinovich, G.S., Zavolsky, N.A. Theory of non-stationary processes in gyrotrons with low Q resonators (1986) International Journal of Electronics, 61 (6), pp. 881-894.
7. M.Yu. Glyavin, I.V. Osharin, A.V. Savilov, To the feasibility of a pulsed gyrotron with a peak rf power exceeding the power of the operating electron beam, Applied Physics Letters, 111, 073504 (2017).