

УДК 621.385.6

## ГИРОТРОН НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ ЦИКЛОТРОННОЙ ЧАСТОТЫ И РАБОЧЕЙ МОДЕ $H_{06}$

С.В. КОЛОСОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 31 октября 2013

Моделирование процессов в гиротроне показало, что можно создавать миллиметровые гиротроны, работающие на второй гармонике циклотронной частоты с КПД более 27 %. Проанализировано, как возрастают омические потери в стенках резонатора при продвижении в субмиллиметровый диапазон длин волн. Для продвижения в миллиметровый и субмиллиметровый диапазон длин волн следует использовать более высокие типы волн для снижения потерь энергии в стенках волновода или использовать сверхпроводящие резонаторы, например, из ниобия.

*Ключевые слова:* гиротрон, гармоники гирочастоты, миллиметровый диапазон длин волн.

### Введение

Продвижение гиротронов в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны длин волн сталкивается с проблемой низкого КПД и требованием наличия сверхпроводящих магнитов с высокой индукцией. Обыкновенные гиротроны на модах шепчущей галереи требуют пространственно развитой магнитной системы и возникает проблема селекции мод [1]. Уменьшение индукции постоянного магнитного поля возможно при работе на гармониках циклотронной частоты. Однако это значительно снижает эффективность генератора. Компромисс заключается в работе на второй гармонике гирочастоты, когда КПД снижается не так значительно по сравнению с первой гармоникой, а значение постоянного магнитного поля может быть уменьшено вдвое.

Уменьшение размеров рабочего пространства гиротрона без значительной потери мощности СВЧ в стенках волновода может быть достигнуто при работе на симметричных по азимуту типах волн –  $TE_{0n}$ . При этом, конечно, уже нельзя будет достичь той же выходной мощности, как в гиротронах на модах шепчущей галереи.

### Результаты моделирования

Для расчета гиротронов была использована программа Гуго-К из комплекса CEDR [2, 3]. В основу математической модели подсистемы Гуго-К положен метод преобразования координат, который приводит к задаче возбуждения регулярного волновода с измененной метрикой пространства [4].

Этот метод совместно с проекционным методом позволяет свести трехмерную задачу к одномерной, что значительно сокращает время вычислений по сравнению с такими программными пакетами, как GSTStudio [5], Карат [6] и другие, которые используют конечно-разностные методы решения краевых задач электродинамики.

В расчетах учитывались восемь волновых мод  $TE_{01} - TE_{08}$ . Параметры электронного потока были следующими:  $\beta_0 = v/c = 0,2719$ ,  $\sigma = I_0 \cdot 0,737 \cdot 10^{-3} = 0,00383$ , питч фактор  $q = V_{\perp}/V_z = 1,3$ .

Магнитостатическое поле:  $F(z) = \frac{\mu_e H_z^0(z)}{\omega_0} = \frac{1,748 \cdot 10^{11} \cdot B_0 [T]}{2\pi \cdot f_0 [Hz]} = 0,5125$ . Радиус ведущего

центра:  $r_{рвц} = \frac{2\pi R_{рвц}}{\lambda} = 2,953$  [рад]. Длина прибора:  $z = \frac{2\pi L}{\lambda} = 203$  [рад].

В качестве рабочей моды была выбрана мода  $TE_{06}$ .  $F_2$  – функция фазовой группировки электронного потока по второй гармонике:

$$F_2(z) = 1 - \left[ \frac{\left( \frac{2}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \cos(-\arctg(\beta_{xi}/\beta_{yi}) - t_i) \cdot \sin(-\arctg(\beta_{xi}/\beta_{yi}) - t_i) \right)^2}{+ \left( \frac{2}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \cos^2(-\arctg(\beta_{xi}/\beta_{yi}) - t_i) - 1 \right)^2} \right],$$

где  $\beta_{\perp}$  – нормированная на скорость света средняя поперечная скорость электронов; КПДе – электронный КПД; КПДв – волновой КПД;  $E_{\perp}$  – нормированное значение поперечной компоненты электрического поля для  $TE_{06}$  моды.

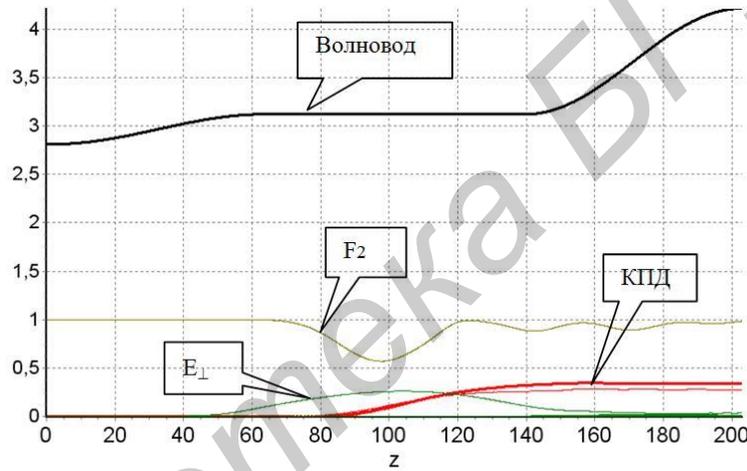


Рис. 1. Профиль волновода и основные интегральные характеристики гиротрона

Гиротрон обладает электронным КПД, равным 33 %, и волновым КПД, равным 27 %. Разница между КПД определяется омическими потерями в стенках волновода. Для волновода из меди потери составляют 6 % от мощности электронного потока. Следует отметить, что в выходной секции волновода часть энергии волны  $TE_{06}$  преобразуется в энергию мод  $TE_{05}$  и  $TE_{07}$ .

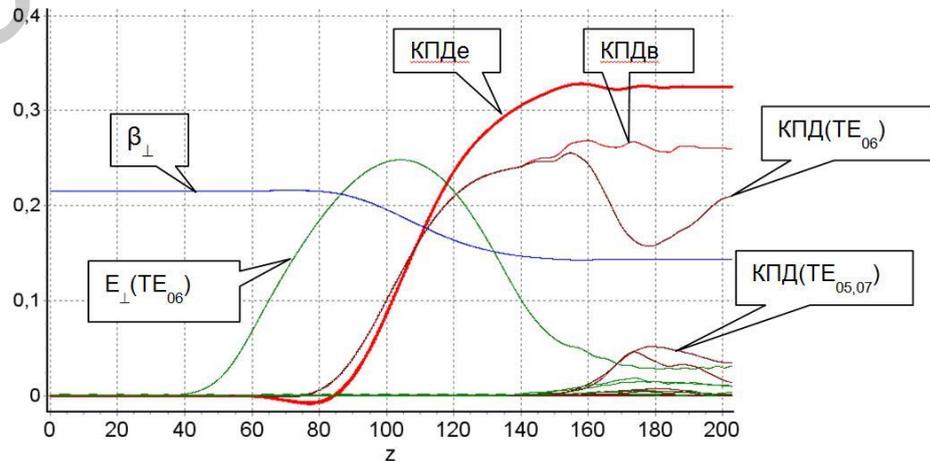


Рис. 2. Интегральные характеристики гиротрона

Из рис. 3 видно, что на ларморовской орбите формируются два фазовых сгустка электронов, что характерно для работы на второй гармонике гирочастоты.

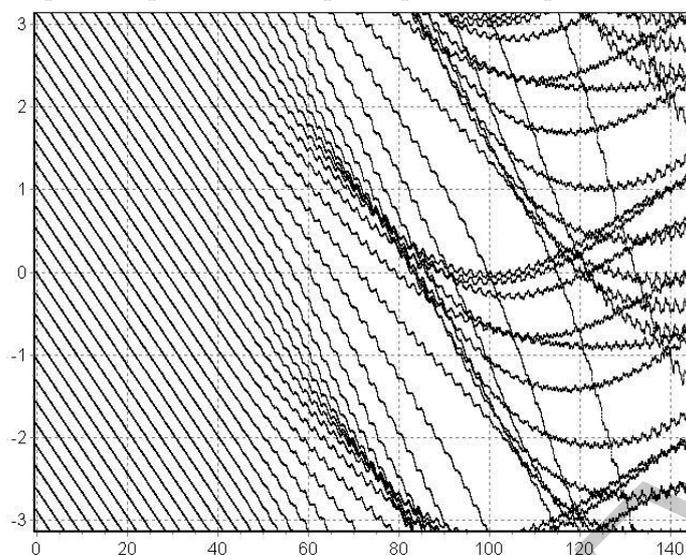


Рис. 3. Фазовые траектории электронов

Рис. 4 и рис. 5 показано, что максимальное значение напряженности электрического поля находится в ближайшей к оси пучности поля и его значение убывает при приближении к стенке волновода. Это позволяет существенно уменьшить омические потери в стенке волновода для моды  $TE_{06}$  по сравнению, например, с модой  $TE_{02}$ , а это особенно актуально для продвижения в миллиметровый и субмиллиметровый диапазон длин волн.

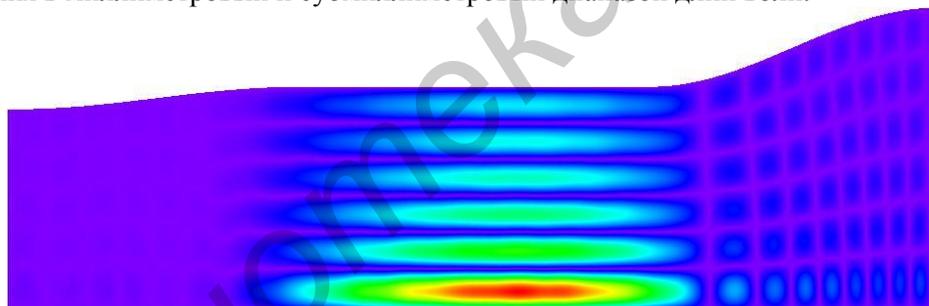


Рис. 4. Продольное сечение модуля электрической напряженности поля в волноводе гиротрона

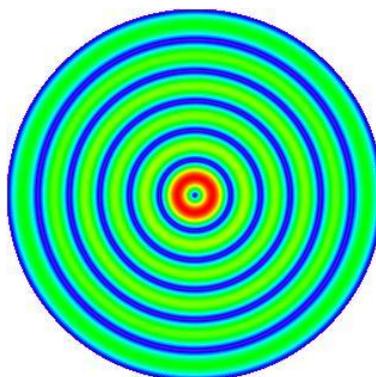


Рис. 5. Поперечное сечение модуля электрической напряженности поля в волноводе гиротрона

Было проведено исследование зависимости добротности открытого резонатора гиротрона от рабочей частоты. Результат исследования представлен на рис. 6.

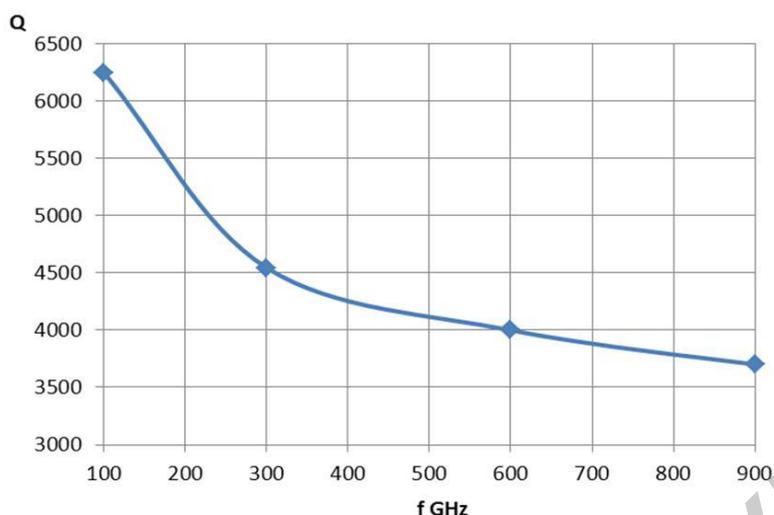


Рис. 6. Зависимость собственной добротности резонатора от частоты для волновода из меди

Из рис. 6 видно, что при увеличении рабочей частоты гиротрона добротность его резонатора уменьшается, что приводит к повышению пускового тока и увеличивает потери в стенках резонатора. Было рассчитано, что при частоте 900 ГГц электронный КПД составит 30 %, а волновой КПД – 22 %. Потери в стенках волновода при этом составят 8 % от мощности электронного потока.

Были проведены расчеты гиротрона на моде  $H_{02}$  для второй гармоники гирочастоты и тех же параметров электронного потока и длины прибора. Результаты расчетов приведены на рис. 7.

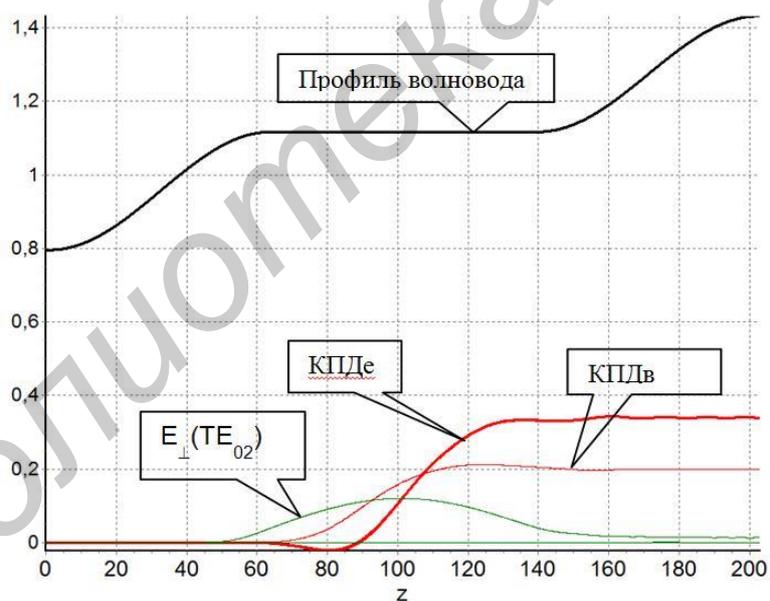


Рис. 7. Интегральные характеристики гиротрона на моде  $H_{02}$

Как следует из рис. 7, электронный КПД (КПДэ) достигает тех же значений, что и для моды  $H_{06}$  – 33 %, но волновой КПД (КПДв) составляет только 20 %, в то время как для моды  $H_{06}$  он составлял 27 %. Это означает, что потери в стенках волновода для моды  $H_{02}$  составляют 13 % от мощности электронного пучка, а не 6%, как это наблюдается при работе на моде  $H_{06}$ .

Положительный эффект в этом случае заключается в том, что практически отсутствуют в выходном сигнале высшие моды по сравнению с гиротроном на  $H_{06}$  моде, где на выходе наблюдаются моды  $H_{05}$  и  $H_{07}$ .

Расчитанная дифракционная добротность резонатора с учетом потерь в стенках волновода для моды  $H_{02}$  и рабочей частоты 300 ГГц составила  $Q = 3125$ , а для моды  $H_{06}$  добротность составляет  $Q = 4545$ .

### Заключение

В результате проведенного исследования было показано, что можно создать миллиметровые гиротроны, работающие на второй гармонике циклотронной частоты с КПД более 27 %. Для продвижения в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны длин волн следует использовать более высокие типы волн для снижения потерь энергии в стенках волновода или использовать сверхпроводящие резонаторы, например, из ниобия.

## GYROTRON AT THE SECOND HARMONIC OF THE CYCLOTRON FREQUENCY AND WORKING MODE $H_{06}$

S.V. KOLOSOV

### Abstract

Modeling processes in gyrotron showed that it is possible to create millimeter gyrotron operating at the second harmonic of the cyclotron frequency with an efficiency of over 27 %. Ohmic losses increasing process in the resonator walls advancing into the submillimeter wavelength range were analyzed. To advance millimeter and submillimeter wavelength range should use higher wave types to reduce energy losses in the waveguide walls or use superconducting resonators, for example, niobium.

### Список литературы

1. *Запезалов В.Е.* Методы повышения эффективности одномодовой генерации мощных гиротронов. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 2008.
2. *Kolosov S.V., Kurayev A.A., Senko A.V.* // IVEC. 2010. P. 115–116
3. *Колосов С.В., Кураев А.А., Синицын А.К. и др.* Компьютерный программный комплекс «КЕДР» / Свидетельство о регистрации компьютерной программы № 389.
4. *Колосов С.В., Кураев А.А., Сенько А.В.* // Техника и приборы СВЧ. 2009. № 2. С. 8–13.
5. Complete Technology for 3D EM Simulation / CST Computer Simulation Technology AG. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cst.com/> – Дата доступа: 24.02.2012.
6. *Tarakanov V.P.* User's manual for Code KARAT. California, 1992.