

МИЛЛИМЕТРОВЫЙ ГИРОТРОН НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ ЦИКЛОТРОННОЙ ЧАСТОТЫ

С.В. КОЛОСОВ, А.А. КУРАЕВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
kolosov@bsuir.by*

Проведено моделирование миллиметрового гиротрона, работающего на второй гармонике циклотронной частоты. Рабочая мода гиротрона – H_{06} круглого волновода. Оптимальный вариант гиротрона обладает КПД 27 % при следующих параметрах прибора: пинч фактор $q = 1.3$, ускоряющее напряжение 20 кВ, ток – 5.2 А, выходная мощность 28 кВт, рабочая частота 300 ГГц.

Ключевые слова: гиротрон, нерегулярные волноводы, миллиметровые волны.

Продвижение гиротронов в миллиметровый и субмиллиметровый диапазон 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 уменьшена в два раза. 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.

Для расчета гиротронов была использована программа Гуго-К из комплекса CEDR [2, 3]. В основу математической модели подсистемы Гуго-К положен метод преобразования координат, которая заменяет задачу возбуждения нерегулярного волновода задачей возбуждения регулярного волновода с изменяющейся метрикой пространства [4]. Этот метод позволяет свести трехмерную задачу к одномерной, что значительно сокращает время вычислений.

В расчетах учитывались восемь волновых мод $TE_{01} - TE_{08}$ со следующими параметрами электронного пучка: нормированная скорость электронов – $\beta_0 = v/c = 0.2719$, нормированный ток пучка электронов – $\sigma = I_0 \eta_0 \mu_0 / c = I_0 \cdot 0.737 \cdot 10^{-3} = 0.00383$, пинч фактор – $q = V_{\perp} / V_z = 1.3$.

$$\text{Магнитостатическое поле} - F(z) = \frac{\mu_0 e H_z^0(z)}{\omega_0} = \frac{1.748 \cdot 10^{11} \cdot B_0 [T]}{2\pi \cdot f_0 [Hz]} = 0.5125.$$

$$\text{Радиус ведущего центра электронных орбит} - r_{pвц} = \frac{2\pi R_{pвц}}{\lambda} = 2.953 [pad].$$

Длина прибора – $z = 2\pi L / \lambda = 203 [pad]$.

В качестве рабочей моды была выбрана мода TE_{06} . Профиль волновода и основные характеристики устройства, показанного на рис. 1.

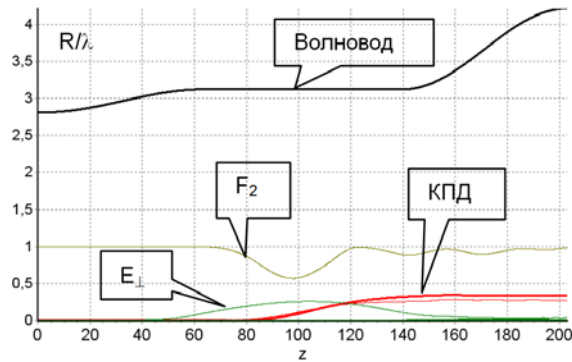


Рис. 1. Профиль волновода и основные интегральные характеристики гиротрона

Где –
$$F_2(z) = 1 - \left[\frac{\left(\frac{2}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \cos(-\text{Arctg}(\beta_{xi}/\beta_{yi}) - t_i) \sin(-\text{Arctg}(\beta_{xi}/\beta_{yi}) - t_i) \right)^2}{\left(\frac{2}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \cos^2(-\text{Arctg}(\beta_{xi}/\beta_{yi}) - t_i) - 1 \right)^2} \right]$$
 – функция поперечной груп-

пировки электронного потока на второй гармонике циклотронной частоты.

Гиротрон обладает электронным КПД – 32 % и волновым КПД – 27 %. Разница между КПД определяется омическими потерями в стенках волновода, которые составляют 5,2 кВт.

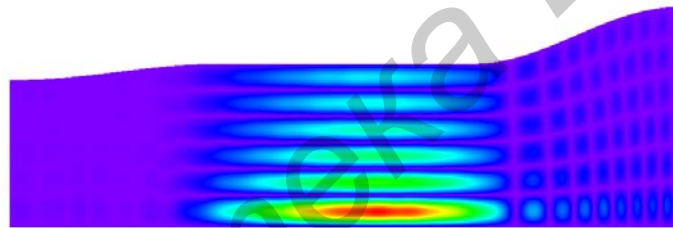


Рис.2. Продольное сечение электрической напряженности поля в волноводе гиротрона

Рис. 2 иллюстрирует, 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.

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.

Список литературы

1. *Запезалов В.Е.* Методы повышения эффективности одномодовой генерации мощных гиротронов: Дис. докт. физ.-мат.наук, Нижний Новгород, 2008, с.194.
2. *Kolosov S.V., Kurayev A.A., Senko A.V.* // IVEC-2010, Monterey, USA, p.115-116.
3. Свидетельство о регистрации компьютерной программы №384. Компьютерный программный комплекс КЕДР / правообладатель БГУИР / Авторы: Колосов С.В., Кураев А.А., Сеницын А.К., Аксенчик А.В.; заявл.19.01.2012; внесена в реестр Национального центра интеллектуальной собственности БР – 07.02.2012.
4. *Колосов С.В., Кураев А.А., Сенько А.В.* // Техника и приборы СВЧ. – 2009. – №2. – 8-13с.