

Моделирование резонаторов с селективными фотонными структурами для субтерагерцовых гиротронов на высоких циклотронных гармониках

Е.М. Новак^{1,2}, А.В. Савилов^{1,2}, Г.И. Калынова¹

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

²ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Аннотация: В этой работе мы исследуем резонатор фотонной структуры, образованной двумя параллельными гофрированными зеркалами, действующими как две дифракционные решетки. Такая система поддерживает только поперечные моды высокой добротности с частотами отсечки, расположенными в узкой полосе, близкой к соответствующему брэгговскому резонансу. В данной работе была разработана и смоделирована 2D-модель резонатора брэгговского типа с частотой 90 ГГц, на основе HFSS-моделирования систематизированы данные о собственных частотах и добротностях для такой системы. Кроме того, были получены оценки стартовых токов для гиротронов на основе резонатора с данной фотонной структурой.

Ключевые слова: гофрированное зеркало, эшелетчатая решетка, конфигурация Литтроу, селективность, брэгговский резонанс

1. Введение

Как правило, резонаторы субтерагерцовых электронных циклотронных мазеров (гиротронов) имеют слишком большие размеры, и как следствие, возникает проблема плотного спектра мод в гиротронах, работающих на 2-й и 3-й гармониках. Это приводит к тому, что для реализации терагерцовых гиротронов с высокими гармониками требуются специальные методы для повышения селективности мод.

В работе [1] был предложен способ прореживания спектра мод за счет создания резонатора на основе фотонной структуры. Такой резонатор образован двумя параллельными гофрированными зеркалами брэгговского типа, действующими как две дифракционные решетки (Рис. 1). Период и амплитуда гофрировки каждого из этих двух зеркал выбраны таким образом, чтобы обеспечить полное отражение волны, падающей под углом 45° к поверхности, обратно в том же направлении (в направлении падения волны) по дифракционному механизму (-1)-го порядка. Естественно, это возможно только в относительно узкой полосе частот, где обеспечивается соответствующий резонанс брэгговского типа. В результате такая система поддерживает только поперечные моды высокой добротности с частотами отсечки, расположенными в узкой полосе (Рис. 1). Другим преимуществом этой системы является возможность осуществления плавной механической регулировки частоты рабочего режима путем изменения расстояния между зеркалами, образующими резонатор. Эта возможность очень привлекательна с точки зрения спектроскопии.

В этой статье была разработана и смоделирована двумерная модель резонатора брэгговского типа с частотой 90 ГГц. Частотный диапазон был выбран с точки зрения удобства проведения эксперимента, который предполагает использование методов металлизации напечатанных на 3D-принтере структур на основе фотополимера.

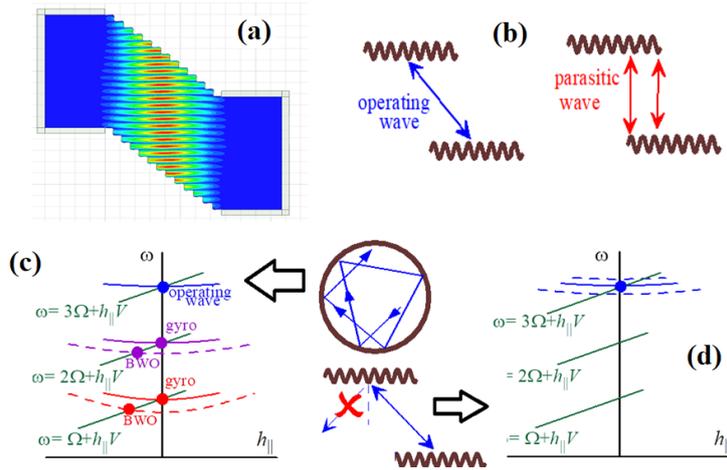


Рисунок 1. (а) Поперечное сечение резонатора фотонной структуры. (б) Рабочая волна в резонансе с фотонной структурой и паразитная нерезонансная волна (типа Фабри-Перо). (с) Конкуренция волн, возбуждаемых на различных циклотронных гармониках в традиционном гиротроне. (д) Отсутствие такой конкуренции в случае планарного гиротрона с фотонной структурой.

2. Модель резонатора и добротности собственных мод

Двухмерная схема предлагаемого резонатора показана на Рисунке 2 а. Резонатор состоит из двух параллельных гофрированных плоскостей, наклоненных под углом 45 градусов и сдвинутых друг от друга на расстояние h_0 . В своей работе мы используем синусоидальную гофрировку. Период $d_0 = 2.35$ мм и амплитуда $a_0 = 0.48$ мм гофрировки подбираются таким образом, чтобы плоскости, образующие дифракционные решетки, отражали волну только в (-1)-м направлении дифракции (Рис. 2 б). Таким образом, период гофрировки, d_0 , определяется условием брэгговского резонанса: $2k_0 \cos \alpha = h$, где $k_0 \approx \omega/c$ – проекция волнового числа на вертикальное направление, $h = 2\pi/d_0$ – волновое число гофрировки, α – угол отклонения волны от вертикали (Рис. 2 б). Очевидно, что $k_0 d_w = \pi n$, где n – число вариаций поля, а d_w – расстояние, которое проходит волна между двумя отражениями от гофрированной металлической поверхности. Учитывая, что угол наклона решеток относительно вертикальной оси составляет 45°, легко получить следующую формулу:

$$d_w = \frac{h_0}{\sqrt{2} \sin \alpha}. \quad (1)$$

Мы должны правильно учитывать дифракционные потери в виде излучения, выходящего из обеих боковых открытых стенок. В численных расчетах мы окружили боковые стенки прямоугольным поглотителем (Perfect Match layers).

Длина гофрированного зеркала была выбрана равной $l = m d_0$, где m – число периодов гофрировки. Расстояние между двумя решетками пропорционально числу вариаций поля в поперечном сечении, $h_0 \sim n$. В связи с этим будет более удобно перейти от длины решетки l и расстояния между плоскостями h_0 к параметрам именно m и n , которые оба являются целыми числами.

Согласно простому анализу, учитывающему отражение от концов резонатора, добротность рабочей волны этого резонатора определяется по следующей формуле (Рис. 3):

$$Q = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} (1 + 2m^2) (1 + T^2). \quad (2)$$

Где, $T = 1 + R$ – коэффициент прохождения, $R = \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2}$ – коэффициент

отражения, $h_1 = \pi/\sqrt{2}d_0$, $h_2 = k_{\perp} = \pi/l$.

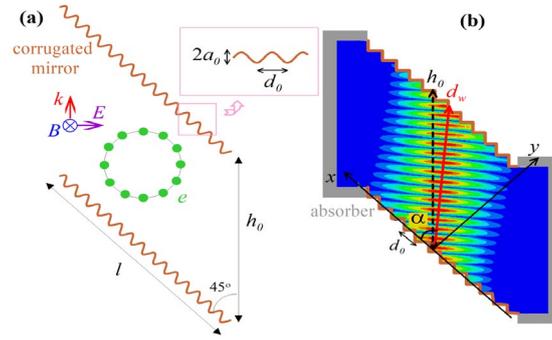


Рисунок 2. (а) Двумерная модель резонатора фотонной структуры. (б) Электрическое поле собственной моды в виде стоячей волны, ограниченное двумя металлическими дифракционными решетками. Изображение взято из HFSS.

Удобно представить результаты, введя отношение поперечной площади, занимаемой паразитной волной типа Фабри-Перо, к площади, занимаемой рабочей волной (Рис. 4):

$$S_w = \frac{lh_0}{\sqrt{2}} = \frac{d_0^2}{2} m \times n, \quad S_{par} = \frac{h_0}{\sqrt{2}} \left(l - \frac{h_0}{\sqrt{2}} \right) = \frac{d_0^2}{2} \left(m \times n - \frac{n^2}{2} \right), \quad K = \frac{S_{par}}{S_w} = 1 - \frac{n}{2m}. \quad (3)$$

Результаты численного моделирования, а именно зависимость собственной частоты и добротности от числа вариаций поля, n , и числа периодов гофрировки, m , в случаях с различными параметрами, K , отмечены сплошной линией, а результаты аналитической теории – пунктирной линией (Рис. 3). Графики для разных параметров K показаны разными цветами. Видно, что и частота, и добротность зависят от длины решетки, но не зависят от расстояния между гофрированными поверхностями [для разных параметров K мы имеем разное соотношение между параметрами n и m : $n = 2m(1 - K)$].

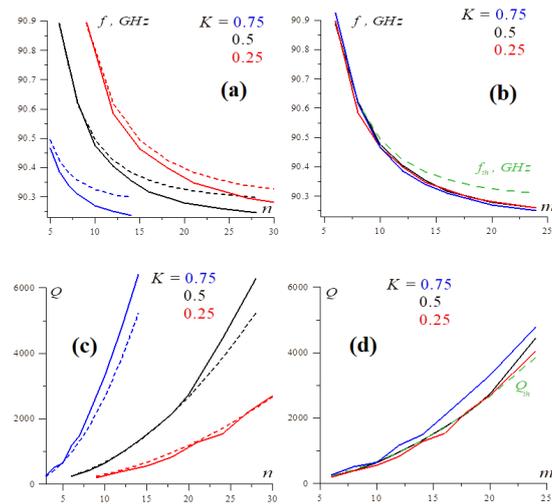


Рисунок 3. Частота (а), (б) и добротность (с), (д) собственной моды в зависимости от числа вариаций поля между гофрированными зеркалами, n , и от числа периодов гофрировки, m , в случае различных параметров отношения площадей $K = 0.25, 0.5$ и 0.75 .

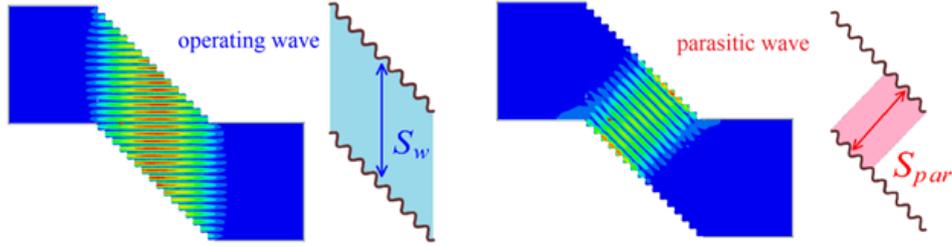


Рисунок 4. Рабочая волна в резонансе брэгговского типа с фотонной структурой и резонансная паразитная волна Фабри-Перо.

3. Расчеты стартовых токов для гиротрона на высоких циклотронных гармониках

Стартовый ток гиротрона, работающего на высокой гармонике, может быть найден на основе асимптотической теории, которая справедлива для гиротронов со слабым электронно-волновым взаимодействием [2]. В случае приосевого электронного пучка (Рис. 5 а), выражение для стартового тока имеет следующий вид:

$$I_{\bullet}^{st} = I_A \times \frac{S_w}{Q l_z^2} \times \frac{(\beta_{\parallel})^3}{(\beta_{\perp})^{2s}} \times \left(\frac{2^s \times s!}{s^s} \right)^2 \times \frac{\gamma}{16\pi\eta}. \quad (4)$$

Здесь, символ « \bullet » означает приосевой пучок, $I_A = mc^3/e = 17$ кА, s – номер циклотронной гармоники, l_z – длина резонатора, $\beta_{\parallel,\perp} = v_{\parallel,\perp}/c$ – нормированная скорость электрона, а $\eta \approx 0.08$ – нормированный КПД, найденный в линейной.

Если мы рассмотрим гиротрон с приосевым пучком мощностью 80 кВ/1А, с питч-фактором равным 1,3 [3,4], то в случае $K = 0,5$ для работы гиротрона на третьей циклотронной гармонике требуется резонатор длиной ~ 50 длин волн, а в случае при работе на четвертой циклотронной гармонике длина резонатора должна составлять ~ 125 длин волн. Обратите внимание, что приведенные выше оценки получены для добротности полостей, образованных плоскими гофрированными зеркалами.

В случае трубчатого электронного пучка (Рис. 5 б) выражение для стартового тока принимает следующий вид:

$$I_{\circ}^{st} = I_{\bullet}^{st} / F, \quad (5)$$

Здесь, I_{\bullet}^{st} – стартовый ток приосевого пучка, а $F \leq 1$ – фактор, описывающий разницу в электронно-волновом взаимодействии для электронов с разными фазами Ψ :

$$F = \langle \sin^2(kR \sin\Psi + k\gamma_c + \frac{\pi}{2}(s-1)) \rangle_{\Psi}, \quad (6)$$

Коэффициент F должен быть максимизирован путем выбора правильного местоположения точки ввода электронного пучка, $k\gamma_c$, а также правильного радиуса электронного пучка, R (Рис. 5).

Рисунок 5 е иллюстрирует зависимость максимального (в точках ввода пучка, $k\gamma_c$) форм-фактора $F(R)$ от радиуса электронного пучка R . Для нечетных гармоник $s = 1,3,5 \dots$ центр орбиты пучка расположен на одном из максимумов волнового поля для нечетных максимумов зависимости $F(R)$ и на одном из нулей волнового поля для четных максимумов зависимости $F(R)$. В случае четных гармоник $s = 2,4,6, \dots$ – ситуация противоположная.

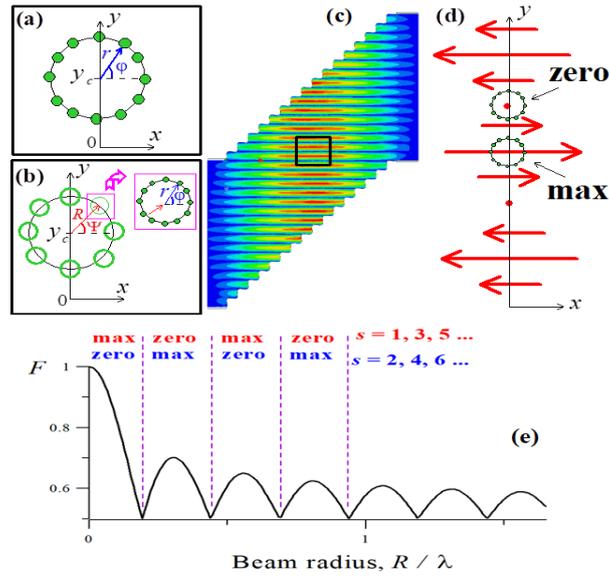


Рисунок 5. (а) Приосевой пучок. (б) Трубочатый электронный пучок. (с) и (д) Иллюстрации различных точек ввода электронного пучка (показаны один максимум и один ноль поля). (е) максимальное значение (по точкам ввода пучка) фактора F в зависимости от радиуса электронного пучка R и оптимальных точек ввода электронного пучка при различных рабочих циклотронных гармониках s .

4. Заключение

Мы описали рабочие режимы данной фотонной системы для гиротрона, работающего на высоких циклотронных гармониках. На основе HFSS-моделирования данные о собственных частотах и добротности для такой системы систематизированы в зависимости от параметров дифракционных решеток, точнее, длины решетки и расстояния между гофрированными зеркалами. Также разработаны элементы теории электронно-волнового взаимодействия в гиротроне на основе резонатора с фотонной структурой. Эта теория включает в себя рассмотрение различных конфигураций работающих электронных пучков (приосевого и трубчатого).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № No. 20-72-10116.).

Список литературы

1. Savilov A.V., Shehegolkov D.Yu. Selective photonic-structure cavity for high-cyclotron-harmonic gyrotrons // *Photonics*.—2023.— Т.10.—№ .36.
2. Nusinovich G.S. Introduction to the Physics of Gyrotrons.— John Hopkins Univ. Press: Baltimore, MD, USA, 2004.
3. Bratman V. L. et al. Large-orbit gyrotron operation in the terahertz frequency range// *Phys. Rev. Lett.*—2009.—Т.102.— № 24.— С. 245101
4. Bandurkin I. V. et al. Terahertz large-orbit high-harmonic gyrotrons at IAP RAS: Recent experiments and new design// *IEEE Trans. Electron Devices*.—2018.—Т. 65.—№. 6.— С. 2287.