

Численное моделирование гиротрона с квазиоптическим резонатором для спектроскопических приложений

А.А. Ананичев, А.П. Фокин, В.Н. Мануилов, М.Ю. Глявин

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

Аннотация: В данной работе приводятся результаты численного моделирования гиротрона с рабочей частотой 263 ГГц на основе конфокального двухзеркального квазиоптического резонатора. На основе модели гиротрона с фиксированной продольной структурой поля и произвольным поперечным сечением резонатора для рабочей моды TEM_{080} на первой гармонике циклотронной частоты исследованы режимы генерации. Рассчитана оптимальная длина однородного участка резонатора, построены стартовые токи. В результате расчетов продемонстрировано существенное разрежение спектра и снижение проблемы конкуренции мод по сравнению с традиционными цилиндрическими резонаторами.

Ключевые слова: гиротрон, квазиоптика, резонатор

1. Введение

Гиротрон является мощным источником электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн. В ряде его приложений, в особенности, в задачах спектроскопии и диагностики различных сред существует тенденция на повышение частоты излучения и расширение диапазона перестройки частоты. При этом частота излучения гиротрона на основном циклотронном резонансе близка к циклотронной частоте электронов, их продвижение в более короткие длины волн ограничивается параметрами магнитных систем. При работе на гармониках частота увеличивается пропорционально номеру гармоники, однако при этом увеличивается плотность спектра и усиливается проблема конкуренции мод. С другой стороны, возможности перестройки частоты в традиционных гиротронах также ограничены из-за использования высокочастотных резонаторов и работы вблизи критической частоты.

В качестве решения данной проблемы можно рассмотреть использование резонаторов с конфигурацией, отличной от традиционной цилиндрической. В ряде работ описываются методы селекции колебаний путем добавления мелкомасштабных элементов на стенки цилиндрического резонатора [1,2] или применения резонаторов с трансформацией мод [3]. Такой подход позволяет решить проблему конкуренции мод, но исключает широкополосную перестройку частоты.

Альтернативным подходом является применение резонаторов другого типа – квазиоптических. Данный тип резонаторов имеет значительно более разреженный спектр, чем цилиндрический, что позволяет упростить возбуждение мод высокого порядка в суб-ТГц и ТГц диапазоне при работе как на первой, так и на высоких гармониках циклотронной частоты. К тому же возможность механической подвижки зеркал позволяет обеспечить плавную широкополосную перестройку частоты.

В данной работе приводятся результаты численного моделирования гиротрона с рабочей частотой 263 ГГц на основе конфокального двухзеркального квазиоптического резонатора. В качестве начального приближения исследованы режимы генерации TEM_{080} на первой гармонике циклотронной частоты на основе

модели гиротрона с фиксированной продольной структурой поля и произвольным поперечным сечением резонатора.

2. Численное моделирование

Исходя из геометрических ограничений, накладываемых теплым отверстием соленоида и реализуемыми параметрами электронного пучка в качестве рабочей моды для расчетов была выбрана рабочая мода TEM_{080} , соответствующая частоте излучения 263 ГГц. Исходя из этого была выполнена оценка характерных размеров резонатора (Рис. 1а,б), и рассчитана соответствующая им мембранная функция, определяемая уравнением (1) [4].

$$\Psi(x, y) = \sqrt{\frac{w_0}{w(y)}} \exp\left(-\frac{x^2}{w^2(y)}\right) * \begin{cases} \operatorname{Re} \left[\exp\left(-i \frac{k_{\perp} x^2}{2R(y)}\right) f(y) \right], & p = 2, 4, 6, \dots \\ \operatorname{Im} \left[\exp\left(-i \frac{k_{\perp} x^2}{2R(y)}\right) f(y) \right], & p = 3, 5, 7, \dots \end{cases} \quad (1)$$

где w_0 – ширина перетяжки, $w(y)$ – ширина гауссова пучка, k_{\perp} – поперечное волновое число, $R(y)$ – радиус кривизны волнового фронта, p – поперечный индекс моды, $f(y) = \exp\left[i\left(k_{\perp} y - 0.5 \arctan\left(\frac{2y}{R_c}\right)\right)\right]$ – профиль распределения стоячей волны в поперечном направлении, R_c – радиус кривизны зеркал, равный расстоянию между парой зеркал.

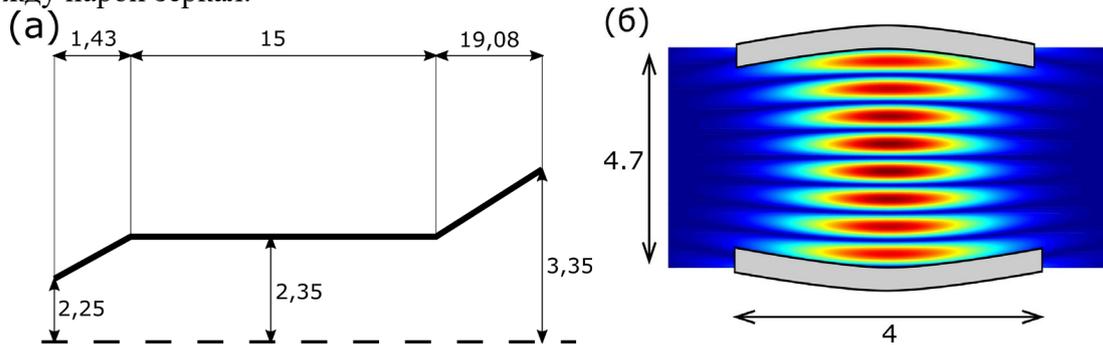


Рисунок 1. Профиль резонатора в продольном (а) и поперечном сечении (б) с распределением электрического поля. Геометрические размеры резонатора указаны в мм.

Используя указанную мембранную функцию, было получено поперечное распределение электрического поля резонатора (Рис. 1б). Далее для определения оптимального радиуса встраля была построена зависимость фактора связи от радиуса электронного пучка (Рис. 2).

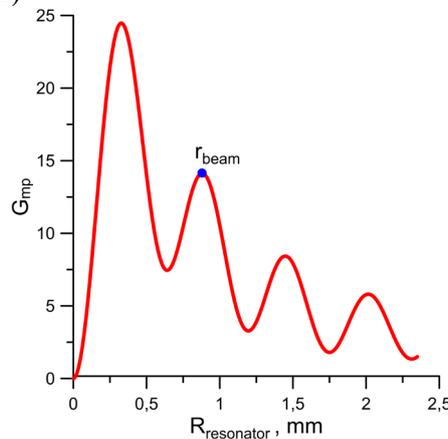


Рисунок 2. Фактор связи электронного пучка с полем резонатора. Синей точкой обозначен выбранный радиус электронного пучка

В качестве электронной пушки предполагается использовать триодную магнетронно-инжекторную пушку (Рис. 3), которая хорошо себя зарекомендовала в классическом гиротроне с частотой 263 ГГц [5]. При токе пучка 0.4 А и ускоряющем напряжении 15 кВ в рамках моноскоростной модели пучка было найдено необходимое значение анодного напряжения и расстояние от центра эмиттера до центра магнитного поля, которые обеспечивают необходимый радиус встрела пучка (Рис. 2, синяя точка) и питч фактор близкий к 1.3

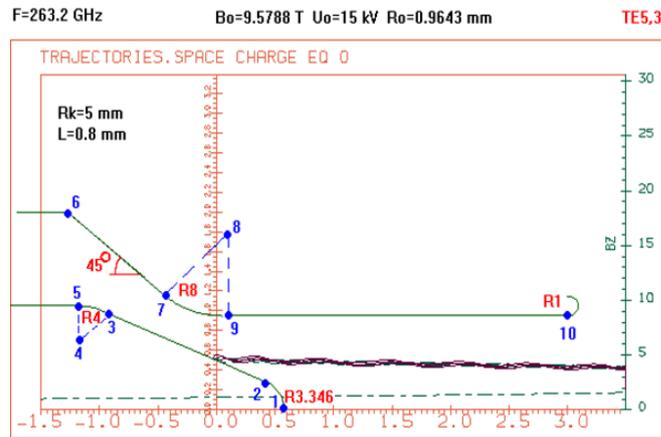


Рисунок 3. Схема выбранной магнетронно-инжекторной пушки

Далее, исходя из возможных параметров МИП, используя модель гиротрона с фиксированной продольной структурой и произвольным поперечным сечением резонатора, а также определение волнового КПД гиротрона (2), были построены зависимости волнового КПД (с учетом омических и дифракционных потерь) от длины резонатора для нескольких значений питч фактора (Рис. 4).

$$\eta_w = \eta_{\perp} * \frac{g^2}{1+g^2} * \left(1 - \frac{Q}{Q_{loss}}\right) \quad (2)$$

где g – питч фактор, Q – общая добротность, Q_{loss} – добротность, связанная с потерями в резонаторе, $\eta_{\perp} = \frac{1}{4\pi^2} \iint (1 - |p_{end}|^2) d\theta d\varphi$ – поперечный КПД, p – импульс электрона. В качестве продольной структуры для расчетов использовалась холодная структура поля в резонаторе заданного профиля. Полученные зависимости позволили определить оптимальную длину однородного участка резонатора, равную 15 мм.

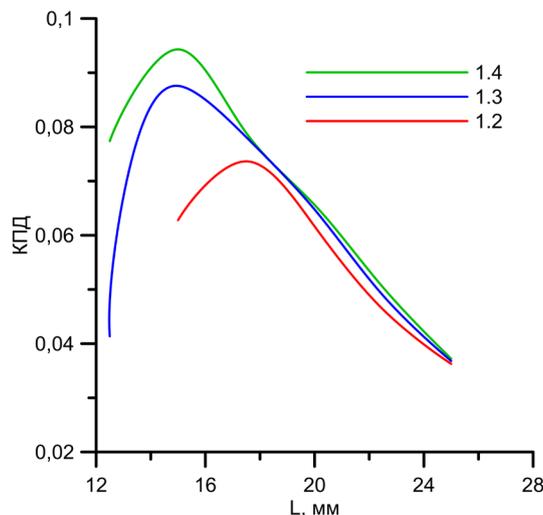


Рисунок 4. Зависимость волнового КПД от длины резонатора для разных значений питч фактора. Выбрана оптимальная длина, равная 15 мм

Зная оптимальную длину резонатора, используя уравнение (3), построили кривые стартовых токов как для рабочей, так и для соседних мод (Рис. 5).

$$I = \frac{1}{N} * \frac{s}{Q \int W(R) |L_s|^2 ds * \left(-\left(s + \frac{d}{d\Delta}\right) |f * \exp(is\Delta\zeta)|^2 \right)} \quad (3)$$

где $W(R)$ – функция распределения электронов по поперечному сечению резонатора, $L_s = \frac{1}{k_\perp} \left(\frac{d}{dx} + i \frac{d}{dy} \right) \Psi(x, y)$ – оператор, характеризующий резонансную составляющую мембранной функции [6], f – функция продольного распределения поля резонатора, s – номер гармоники, Δ – безразмерная расстройка частоты, ζ – безразмерная продольная координата,

$N = -\frac{8\pi e}{mcs} * \frac{1}{\omega^2 \beta_\parallel} \left(\frac{s^s \beta_\perp^{s-2}}{2^s s!} \right) \frac{1}{\int |\Psi|^2 ds \int |f|^2 ds}$ – нормировочный коэффициент для тока электронного пучка.

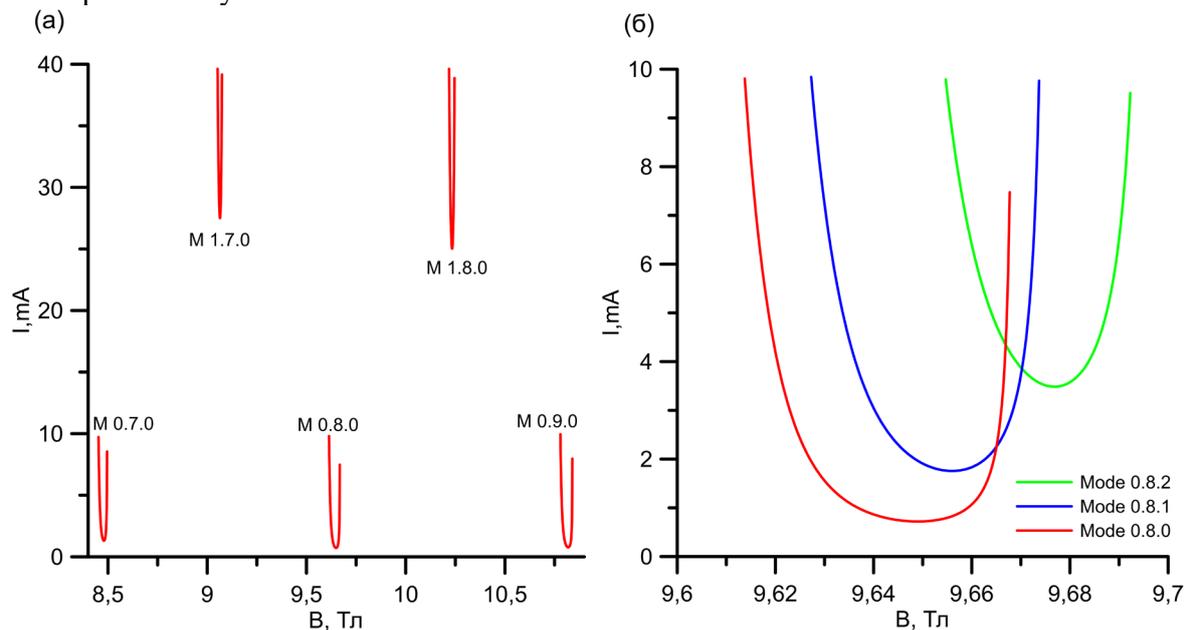


Рисунок 5. Кривые стартовых токов для соседних поперечных мод (а) и для соседних продольных мод (б).

Как видно из рис. 5, спектр собственных мод данного квазиоптического резонатора на первой гармонике сильно разрежен, что свидетельствует об отсутствии проблем с конкуренцией мод. Проведенные расчеты позволяют надеяться на выходную мощность на уровне 500 Вт, что с учетом возможности плавной перестройки частоты делают разрабатываемый прибор уникальным источником излучения в суб-ТГц диапазоне частот

3. Заключение

В ходе данной работы проведено численное моделирование гиротрона с конфокальным двухзеркальным квазиоптическим резонатором, работающем на первой гармонике циклотронной частоты. Исходя из параметров имеющегося соленоида и параметров имеющейся электронной оптики, определены оптимальные размеры резонатора и оптимальный радиус встрела электронного пучка. На основе теории гиротрона с фиксированной продольной структурой поля и произвольной поперечной структурой поля рассчитаны режимы генерации, оптимальная длина резонатора, обеспечивающая оптимальные значения КПД, построены кривые стартовых токов как для рабочей, так и для соседних мод. Полученные результаты позволяют надеяться на получение выходной мощности порядка 500 Вт в широком

диапазоне частот из-за отсутствия конкуренции со стороны паразитных мод.

Работа выполнена при поддержке проекта ИПФ РАН FFUF-2022-0007

Список литературы

1. Bandurkin I. V. et al. Method of Providing the High Cyclotron Harmonic Operation Selectivity in a Gyrotron With a Spatially Developed Operating Mode // IEEE Trans. Electron Devices. 2017. Vol. 64, № 9. P. 3893–3897.
2. Bandurkin I. V. et al. Demonstration of a Selective Oversized Cavity in a Terahertz Second-Harmonic Gyrotron // IEEE Electron Device Lett. 2020. Vol. 41, № 9.
3. PAVEL'EV V.G., TSIMRING S.E., ZAPEVALOV V.E. Coupled cavities with mode conversion in gyrotrons // Int. J. Electron. 1987. Vol. 63, № 3. P. 379–391.
4. Ищенко Е.Ф. Открытые квазиоптические резонаторы. 1980. 208 р.
5. Куфтин А.Н., Мануилов В.Н. Электронно-оптическая система гиротрона с рабочей частотой 263 ГГц для спектроскопических исследований // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2016. Vol. 59, № 2. P. 145–152.
6. Nusinovich G.S. Introduction to the physics of gyrotrons. The Johns Hopkins University Press, 2004.