

Исследование метода селекции мод за счет резонансных рассеивающих элементов в квазиоптическом резонаторе

А.А. Ананичев, А.Э. Федотов, А.П. Фокин, А.А. Богдашов, И.В. Бандуркин

Институт прикладной физики РАН

Аннотация: в работе исследуется метод селекции колебаний открытых резонаторов за счет размещения на одном из зеркал резонансного рассеивающего элемента в виде прямоугольной канавки, параллельной электрическому полю. Представленная задача моделирует селекцию мод в резонаторах гиротронов, работающих на гармониках циклотронной частоты. Для нескольких мод полуконфокального резонатора, соответствующих различным гармоникам, рассчитана добротность колебаний, а также её изменение при размещении на зеркале канавок различных размеров. На основе численного моделирования определена область оптимальных параметров рассеивающих элементов и разработаны детали для натурального эксперимента.

Ключевые слова: гиротрон, квазиоптический резонатор, гармоника, добротность, рассеяние, канавка

1. Введение

Селекция колебаний – одна из основных задач при разработке современных высокочастотных источников излучения – гиротронов [1,2]. Так как частота излучения гиротрона близка к циклотронной частоте электронов, их продвижение в субтерагерцовый (суб-ТГц) и терагерцовый диапазоны частот ограничивается параметрами магнитных систем (так, для достижения частоты в 1 ТГц требуется магнитное поле около 36 Тл). Возможным решением проблемы является переход к работе на гармониках циклотронной частоты, однако при этом усиливается проблема конкуренции мод. Наличие технологических ограничений на размеры резонатора приводит к работе со все более плотным спектром мод, при этом связь электронного пучка с модами на первой гармонике оказывается сильнее, чем с модами на гармониках, что дополнительно усложняет задачу. Поэтому для успешного продвижения в более высокие частоты требуются различные методы селекции колебаний [3–5].

Одним из таких методов является размещение в резонаторе резонансного рассеивающего элемента (Рис. 1), собственная частота которого совпадает с частотой рабочей моды на гармонике [6]. Таким рассеивателем может служить осесимметричная канавка. Канавка влияет на колебания в резонаторе, практически не изменяя добротность рабочей моды с выбранной частотой, при этом заметно снижая добротность остальных мод – конкурентов. Подобное уменьшение добротности паразитных колебаний увеличивает их стартовые токи, что должно позволить возбудить моды на высоких гармониках.

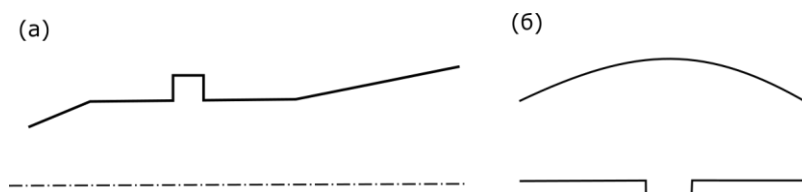


Рисунок 1. Расположение канавки в резонаторе гиротрона (а) и резонаторе Фабри-Перро (б)

В данной работе рассматривается модельная задача: исследование влияния параметров прямоугольной канавки на добротность собственных колебаний открытого резонатора. Вследствие сложности возбуждения высоких мод цилиндрического резонатора в эксперименте на низком уровне мощности, в качестве модели выбран квазиоптический полуконфокальный резонатор, в котором возбуждается низшая поперечная мода. Канавка размещается вдоль диаметра плоского зеркала, что упрощает аналитические оценки.

Следует отметить отличие рассматриваемого случая, когда электрическое поле параллельно стенкам канавки, от хорошо известной конфигурации с противоположной поляризацией, при которой электрическое поле перпендикулярно стенкам канавки. В последнем случае при падении волны по нормали к поверхности и глубине канавки, равной половине длины волны, рассеяние волны полностью отсутствует. Амплитуда поля в канавке при этом равна амплитуде поля в открытом полупространстве, и такая конфигурация полей точно удовлетворяет уравнениям Максвелла. В отличие от этого случая, рассматриваемая в данной работе канавка является резонансным элементом. С одной стороны, это приводит к рассеянию волн на всех частотах, хотя на резонансной частоте рассеяние оказывается минимальным и часто пренебрежимо малы. С другой стороны, благодаря резонансному характеру такого селективного элемента полоса частот, в которой рассеяние мало, может быть сделана достаточно узкой, что позволяет эффективно селективировать моду с близкими частотами.

Целью работы является сравнение аналитических оценок и результатов численного моделирования с результатами модельных экспериментов.

2. Расчет добротности резонатора с резонансным рассеивателем

Для проведения эксперимента была выбрана конфигурация полуконфокального квазиоптического резонатора. Канавка вырезана на плоском зеркале (Рис. 2). В качестве рабочих были выбраны колебания на частотах 45, 90 и 135 ГГц, что соответствует 1, 2 и 3 циклотронным гармоникам в гиротроне.

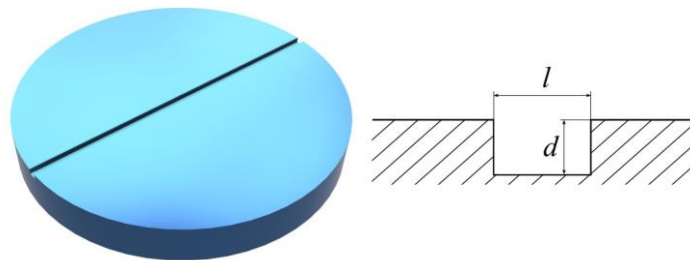


Рисунок 2. Внешний вид плоского зеркала с вырезанной вдоль диаметра канавкой и размеры канавки

Были рассчитаны параметры рабочей моды резонатора [7] так, чтобы пучок с наибольшим диаметром (соответствующий колебаниям на частоте 45 ГГц) на сферическом зеркале был в 2 раза меньше размеров этого зеркала (что позволяет сделать дифракционные потери из-за конечного размера зеркал пренебрежимо малыми), но в то же время был много больше ширины канавки в перетяжке.

Добротность системы была рассчитана как без рассеивающих элементов, так и с ними [8–10]. На добротность влияют дифракционные потери, коэффициент отражения от зеркал и потери на связь (диэлектрическая пленка, расположенная под углом 45 градусов к оси резонатора и используемая для возбуждения колебаний). Омические потери на зеркалах считались малыми.

При падении гауссова пучка на плоское зеркало с канавкой, если размер пучка существенно больше ширины канавки, в качестве приближения можно рассматривать

задачу нормального падения плоской электромагнитной волны на поверхность. Поляризация рассматриваемой волны в квазиоптическом резонаторе Фабри-Перо соответствует электрическому полю вдоль канавки, что соответствует моде TE типа в цилиндрическом резонаторе гиротрона и аксиально-симметричной канавке.

Размеры канавки должны быть выбраны таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечивать малое рассеяние рабочей волны (на высокой частоте), а с другой стороны - сильно рассеивать паразитную волну на более низкой частоте. Размеры канавки были оптимизированы так, чтобы оказывать минимальное воздействие на колебания на 3 гармонике с частотой 135 ГГц. Малое воздействие канавки на рабочую моду с определенной частотой означает что электрическое поле на верхней границе канавки равно нулю. При падении на зеркало плоской волны можно считать, что в канавке возбуждается электромагнитное поле, которое можно разложить по модам ТМ типа планарного волновода-канавки. При ширине канавки менее длины рабочей волны лишь одна из этих мод будет распространяющейся и именно она вносит основной вклад в поля в канавке. При выполнении условия

$$k^2 = \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b_0}\right)^2 \quad (1)$$

тангенциальное электрическое поле этой моды волновода будет равно нулю на границе канавки, так что можно ожидать, что минимальное рассеяние будет при соотношении глубины и ширины, определяемом уравнением (1). В этом уравнении a и b – ширина и глубина канавки, соответственно, k – волновой вектор.

Для эффективного рассеяния паразитных волн ширина канавки должна быть больше или сопоставима с половиной длиной волны колебаний, которые мы хотим подавить. Соответственно, для низшей частоты 45 ГГц, которой соответствует длина волны $\lambda = 6,7$ мм, характерная ширина канавки должна составлять $l \approx 3$ мм.

В программе CST STUDIO была проведено моделирование отражения ЭМ волны от плоского зеркала с канавкой. Для увеличения скорости расчетов было рассмотрено не всё зеркало, а тонкий слой толщиной 0.5 мм, шириной 20 мм и глубиной 20 мм (много больше характерных размеров канавки). На Рис. 3 приведены зависимости коэффициента отражения плоской волны самой в себя от частоты для различных конфигураций канавки.

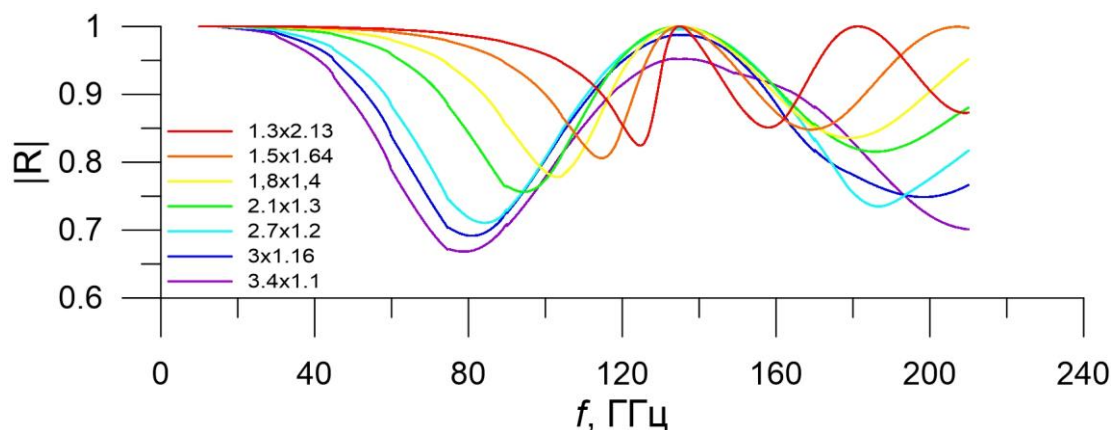


Рисунок 3. Частотная зависимость коэффициента отражения плоской волны от зеркала с канавками разных размеров (глубина и ширина канавок, соответственно, указаны на рисунке).

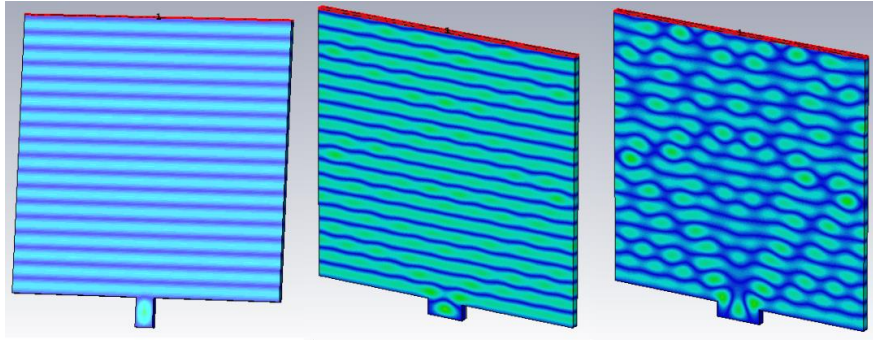


Рисунок 4. Рассчитанное распределение электрического поля в резонаторе на частоте 135 ГГц для канавки шириной 1.3 мм (слева), 2.7 мм (в центре) и 3.4 мм (справа). Видно, что при увеличении ширины канавки структура поля существенно изменяется, что говорит об увеличении рассеяния в другие моды.

При увеличении ширины канавки коэффициент отражения для всех трех выбранных частот уменьшается, что связано с увеличением доли энергии, рассеянной в более высокие моды, что хорошо видно на Рис. 4. На основе выполненных расчетов рассеяния волны получены теоретические оценки добротности колебаний в зависимости от ширины канавки (считая глубину соответствующей резонансу на 135 ГГц), показанные на Рис. 5.

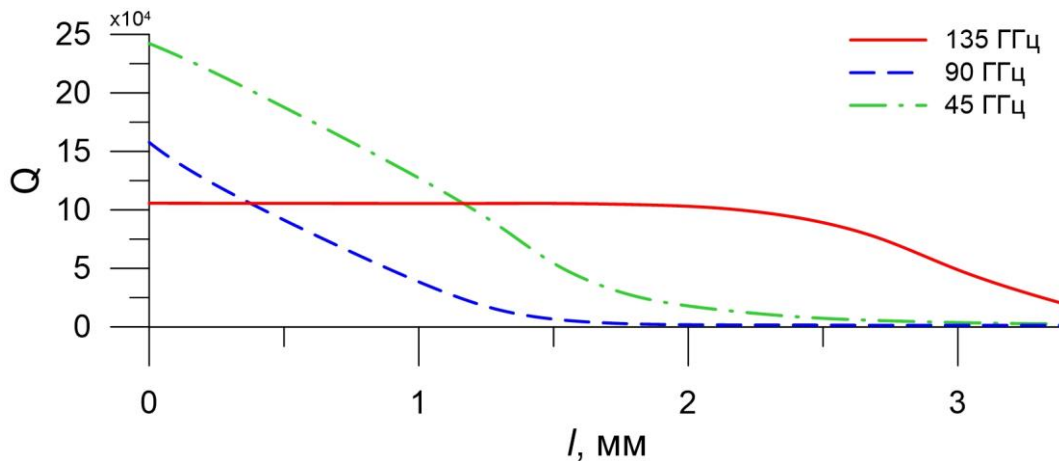


Рисунок 5. Зависимость полной добротности резонатора от ширины канавок. Глубина выбиралась для каждого значения ширины так, чтобы канавка оставалась резонансной для частоты 135 ГГц. Видно, что при увеличении ширины канавок добротность моды с частотой 135 ГГц долгое время остается практически неизменной, в то время как добротности мод на 45 ГГц и 90 ГГц постоянно падают.

Результаты, представленные на Рис. 5, позволяют определить оптимальный диапазон параметров канавки, обеспечивающий, с одной стороны, малое изменение добротности колебаний на 135 ГГц, и, с другой стороны, существенное уменьшение добротности низкочастотных колебаний. В качестве такого диапазона был выбран диапазон ширины канавки от 1,5 до 3 мм.

Для нескольких вариантов размеров канавки, лежащих в выбранном диапазоне, было выполнено численное моделирование возбуждения полного двухзеркального резонатора с уменьшенным по сравнению с предполагающимся экспериментом расстоянием между зеркалами (для уменьшения времени расчетов и требований к вычислительным ресурсам). Параметры сферического зеркала были при этом выбраны таким образом, чтобы параметры пучка на плоском зеркале были идентичны пучку в

большом резонаторе. В результате расчетов была определена добротность колебаний на различных частотах, связанная с рассеянием на канавке, согласующаяся с теоретическими оценками (Рис. 6).

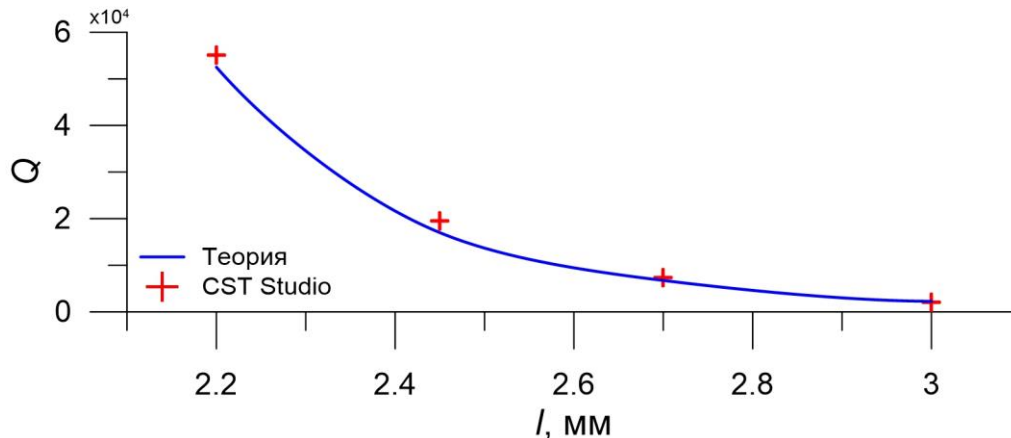


Рисунок 6. Зависимость добротности резонатора, связанной с канавкой, от ширины канавки по результатам теоретических оценок и расчетов резонатора в CST Studio для колебания с частотой 135 ГГц.

3. Заключение

Рассмотрено влияние резонансного рассеивающего элемента в виде прямоугольной канавки на плоском зеркале на добротность колебаний в полуконфокальном квазиоптическом резонаторе. Стенки канавки параллельны направлению электрического поля. Полученные аналитические оценки подтверждаются результатами численного моделирования в программе CST Studio Suite. Исходя из полученных результатов определены оптимальные размеры канавки. Рассчитаны параметры для изготовления зеркал и проведения измерений на малом уровне мощности.

Работа выполнена при поддержке **Российского научного фонда (проект № 19-72-10127)**

Список литературы

1. Flyagin V.A. и др. The gyrotron // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 1977. Т. 25, № 6. С. 514.
2. Litvak A.G., Denisov G.G., Glyavin M.Y. Russian Gyrotrons: Achievements and Trends // *IEEE J. Microwaves.* 2021. Т. 1, № 1. С. 260–268.
3. Belousov V.I. и др. Studies of a Gyrotron with the Echelette Cavity // *Radiophys. Quantum Electron.* 2014. Т. 57, № 6. С. 446–454.
4. Zapevalov V.E., Tsimring S.E. Multibeam gyrotrons // *Radiophys. Quantum Electron.* 1990. Т. 33, № 11. С. 954–960.
5. Zapevalov V.E. и др. Coupled-resonator gyrotrons with mode conversion // *Radiophys. Quantum Electron.* 1984. Т. 27, № 9. С. 846–852.
6. 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. Т. 64, № 9. С. 3893–3897.
7. Lofnes T., Ziemann V., Ferrari A. Analytical Design of a Confocal Resonator // *October.* 2003.
8. Fox A.G., Li T. Resonant Modes in a Maser Interferometer // *Bell Syst. Tech. J.* 1961. Т. 40, № 2. С. 453–488.
9. Boyd G.D., Gordon J.P. Confocal Multimode Resonator for Millimeter Through Optical Wavelength Masers // *Bell Syst. Tech. J.* 1961. Т. 40, № 2. С. 489–508.
10. Li H. и др. Reflection and transmission of Laguerre-Gaussian beams in a dielectric slab // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2017. Т. 195. С. 35–43.