

# Экспериментальное исследование метода селекции мод за счет резонансных рассеивающих элементов в квазиоптическом резонаторе

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

Институт прикладной физики РАН

**Аннотация:** В данной работе описывается экспериментальное исследование метода селекции колебаний за счет резонансных рассеивающих элементов, представляющих собой канавки, расположенные на одном из зеркал полуконфокального квазиоптического резонатора. На основе теоретических и численных расчетов изготовлен ряд зеркал с вырезанными на них канавками. Получены экспериментальные зависимости коэффициента отражения зеркал от частоты, а также значения добротности резонатора на нескольких частотах, в том числе и на резонансной. Полученные данные хорошо согласуются с теоретическими расчетами и численными моделями.

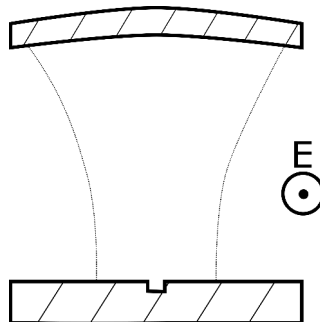
**Ключевые слова:** квазиоптика, резонатор, селекция, мода, рассеяние, добротность

## 1. Введение

Квазиоптические резонаторы активно применяются как в оптике [1], так и в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн [2]. При этом, несмотря на меньшую плотность спектра по сравнению с, например, цилиндрическими резонаторами, задача селекции мод в квазиоптических резонаторах остается важной и актуальной.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию метода селекции колебаний при помощи резонансных рассеивающих элементов [3,4]. Такой элемент должен не возмущать поле выбранной высокочастотной рабочей моды резонатора, и заметно снижать добротность остальных мод-конкурентов. В качестве электродинамической системы, в которой исследуется селекция, был выбран квазиоптический полуконфокальный резонатор, так как в нем достаточно просто возбудить низшую поперечную моду. Резонансный рассеиватель в виде прямоугольной канавки размещается вдоль средней линии плоского зеркала.

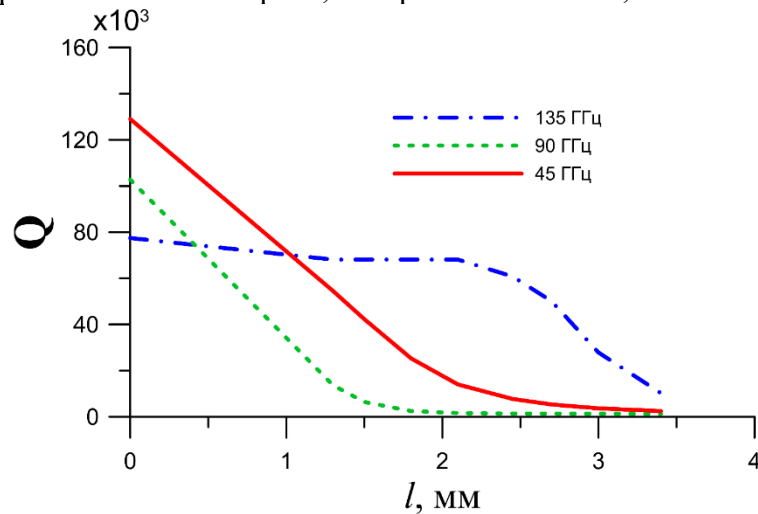
Данная работа продолжает представленные ранее теоретические исследования [5], а ее основной целью является проведение экспериментов с реальными электродинамическими системами и сравнение полученных данных с теоретическими оценками и результатами численного моделирования.



**Рисунок 1.** Схема квазиоптического полуконфокального резонатора с канавкой на плоском зеркале и направлением электрического поля.

## 2. Численное моделирование

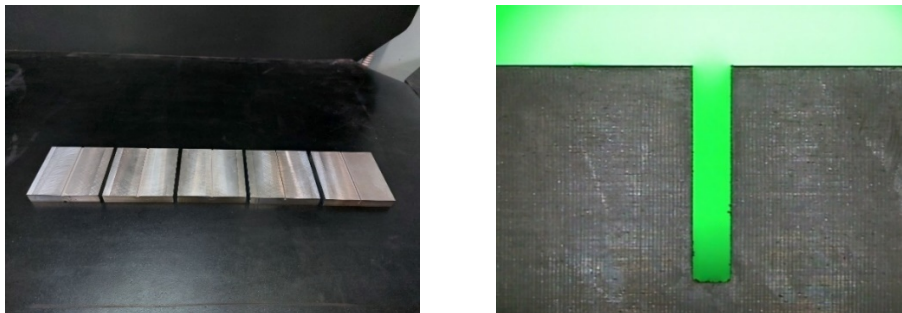
Теоретические расчеты и численные модели представлены в работе [5]. В качестве рабочих частот были выбраны колебания на частотах 45, 90 и 135 ГГц, что при использовании такого резонатора в вакуумной электронике может соответствовать 1, 2 и 3 гармоникам циклотронной частоты. На основе простой теории полуконфокального резонатора был выполнен расчет параметров квазиоптической системы и добротности резонатора. На Рис. 2 приведена зависимость полной добротности резонатора от ширины канавки, при сохранении резонансной частоты рассеивателя равной 135 ГГц. На основе этих данных можно 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. Так же проведена оценка предельной погрешности при изготовлении зеркал, которая составляет 0,01 мм.



**Рисунок 2.** Зависимость полной добротности резонатора от ширины канавок при сохранении резонансной частоты рассеивателя 135 ГГц.

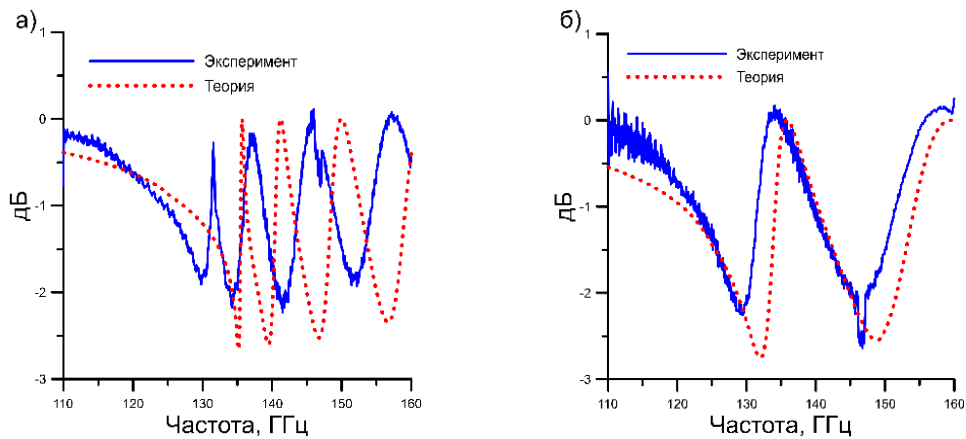
## 3. Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментов на малом уровне мощности были изготовлены 5 плоских алюминиевых зеркал из с вырезанными канавками (Рис. 3). Расчетные и реальные размеры канавок имеют большие расхождения, что должно привести к заметному смещению резонансной частоты.



**Рисунок 3.** Внешний вид изготовленных зеркал и форма канавки под микроскопом.

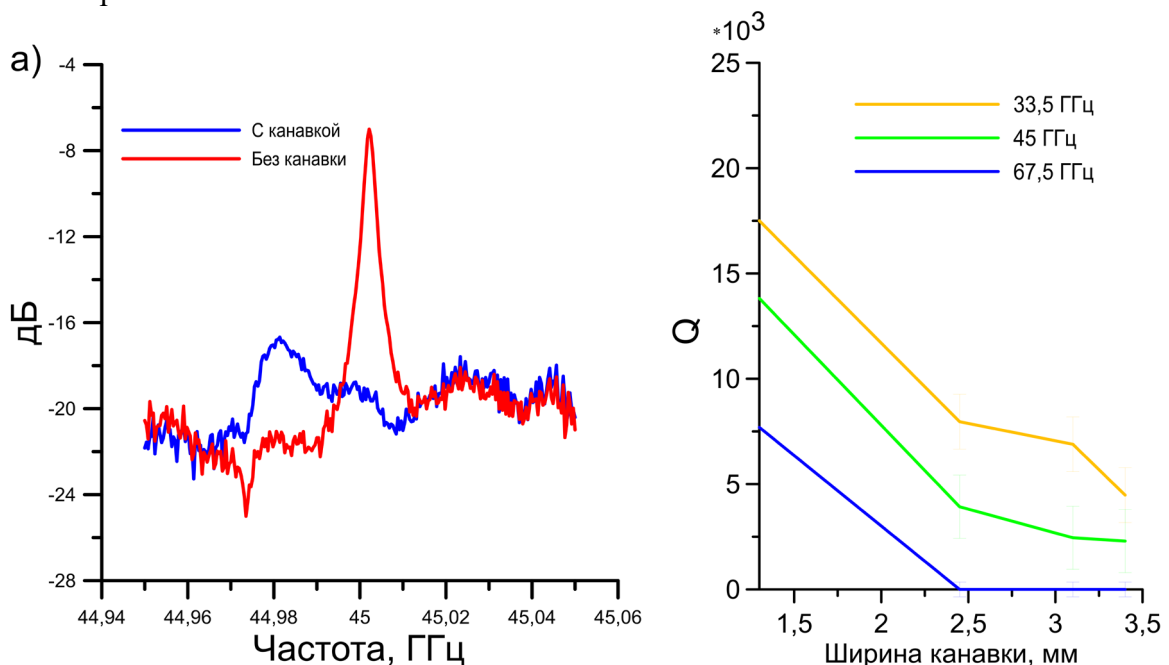
В связи с этим, чтобы определить реальные резонансные частоты, была построена экспериментальная зависимость коэффициента отражения плоского зеркала с канавкой от частоты в диапазоне максимума коэффициента отражения для каждого зеркала (Рис. 4).



**Рисунок 4.** Сравнение теоретической и экспериментальной зависимости коэффициента отражения плоского зеркала с канавкой от частоты в диапазоне  $135 \pm 25$  ГГц для зеркал №1 (1,12x6,63 мм) (а) и №2 (1,18x3,10 мм) (б) зеркал.

Далее были проведены измерения добротности колебаний резонатора на частотах 33.5, 45 и 67.7 ГГц на малом уровне мощности. Во время всех измерений исследовался сигнал, отраженный от резонатора. Размеры рупора и пучка в резонаторе не были согласованы, что снижало величину регистрируемого отраженного сигнала, однако его величины было достаточно для определения добротности.

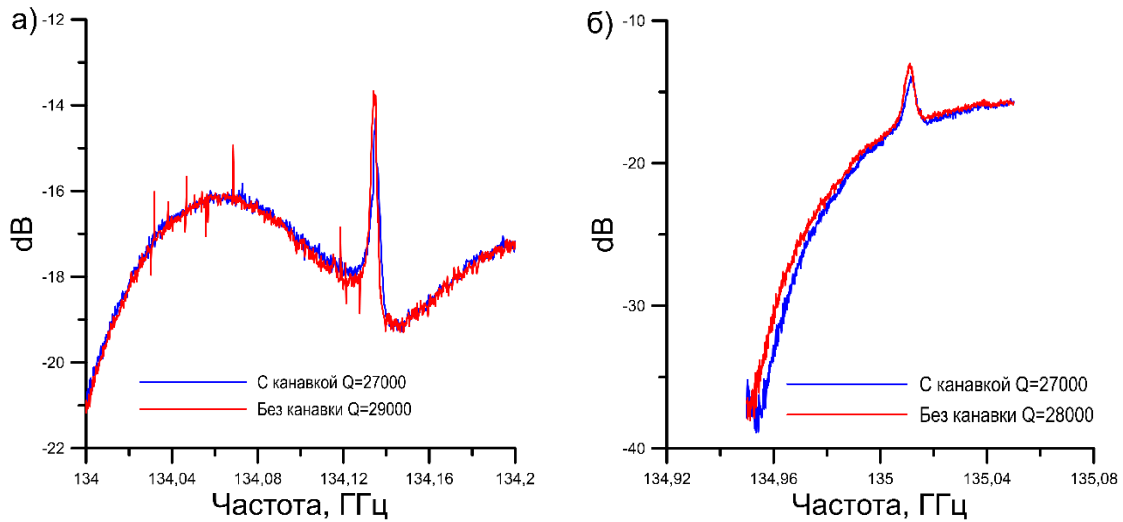
Для измерений на частоте 135 ГГц было решено дополнить систему линзой из SBS пластика для улучшения связи пучка с резонатором. Для уменьшения отражений от линзы было осуществлено просветление гофрировкой. Расстояния между элементами системы и параметры линзы были рассчитаны так, чтобы согласовать пучок на выходе из рупора и моду резонатора и, как следствие, увеличить уровень регистрируемого нами отраженного сигнала.



**Рисунок 5.** Сравнение сигналов с канавкой и без для 4 зеркала на частоте 45 ГГц (а) и сравнение зависимости полной добротности резонатора от ширины канавки в теоретических расчетах и эксперименте (б).

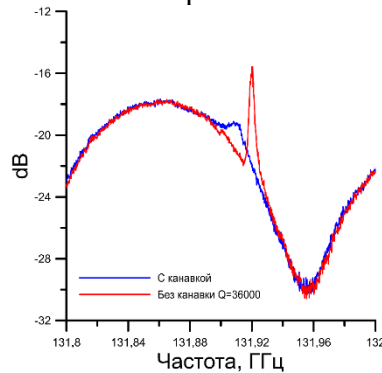
На рисунке 6 представлены полученные сигналы, а также результаты измерений добротности резонатора с зеркалами №2 (1,18x3,10 мм) и №3 (2,45x1,23 мм).

Погрешность при измерении добротности составила  $\pm 1500$ . Сигналы, а также добротность совпали с в пределах погрешности, что говорит о том, что канавка практически не влияет колебания.



**Рисунок 6.** Сигналы, полученные при измерении добротности резонатора на частоте 135 ГГц с зеркалами под номерами 2 (а) и 3 (б) и соответствующие добротности. Видно, что добротность полученных сигналов изменяется в пределах погрешности.

Также были проведены измерения на тех частотах, где коэффициент отражения зеркал отличен от максимума. Так, результат для резонатора с зеркалом №2 на частоте излучения 131,9 ГГц приведен на Рис. 7. В резонаторе с канавкой добротность колебаний упала так, что оценить ее практически невозможно. Это соответствует теоретическим выводам о возможности селекции близкорасположенных по частоте колебаний при помощи канавок малой ширины.



**Рисунок 6.** Сигналы, полученные при измерениях на частотах, где коэффициент отражения для зеркала №2 отличен от максимума. Частота отличается от резонансной для канавки на 2,3 ГГц. Коэффициент отражения от зеркала с канавкой -0,73 ГГц.

#### 4. Вывод

В ходе данной работы экспериментально исследовано влияние резонансного рассеивающего элемента в виде прямоугольной канавки на плоском зеркале на добротность колебаний в полуконфокальном квазиоптическом резонаторе. Канавка размещалась на плоском зеркале таким образом, чтобы стенки канавки были параллельны направлению электрического поля. Исходя из полученных результатов теоретических расчетов и численного моделирования, определены оптимальные размеры канавки. Проведена оценка влияния неточности изготовления зеркал.

Для проведения экспериментов на малом уровне мощности рассчитаны и изготовлены зеркала с резонансными рассеивающими элементами. Сделаны измерения как коэффициента отражения зеркал с канавками, так и влияния канавок на добротность квазиоптического резонатора. Полученные экспериментальные данные хорошо соотносятся с теоретическими и численными моделями.

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

#### Список литературы

1. Ищенко Е.Ф. Открытые квазиоптические резонаторы. 1980. 208 р.
2. Hu W. et al. 140-GHz gyrotron experiments based on a confocal cavity // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1998. Vol. 26, № 3. P. 366–374.
3. 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.
4. 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. P. 1412–1415.
5. Ананичев А.А. et al. Исследование метода селекции мод за счет резонансных рассеивающих элементов в квазиоптическом резонаторе // X всероссийская научно-техническая конференция “Электроника и микроэлектроника СВЧ.” 2021. P. 1–2.