

Многозеркальный открытый резонатор с эшелеттным зеркалом

О.И. Белоус, В.Г. Дудка, В.К. Корнеенков, О.Н. Сухоручко, А.И. Фисун

Институт радиофизики и электроники НАН Украины, ул. ак. Проскуры, 12, 61085 Харьков, Украина

(Получено 25.06.2012; в отредактированной форме – 02.11.2012; опубликовано online 29.12.2012)

В работе исследованы E -поляризованные колебания многозеркального открытого резонатора (ОР), одно из зеркал которого представляет собой эшелетт с равными гранями. Теоретически и экспериментально получены спектры и топология полей E -поляризованных колебаний резонатора в 8-мм диапазоне длин волн.

Ключевые слова: Миллиметровый диапазон длин волн, Открытый резонатор, Эшелеттное зеркало, Спектр колебаний, Топология поля.

PACS numbers: 07.57. – c, 42.60.Da

1. ВВЕДЕНИЕ

Открытые резонаторы (ОР) с отражательными дифракционными решетками типа “эшелетт” широко применяются в высокостабильных по частоте твердотельных и электронновакуумных источниках излучения миллиметрового диапазона длин волн [1]. Если на эшелеттную решетку падает E -поляризованная волна, поведение коэффициента отражения и характер его частотной зависимости существенно отличается от случая H -поляризованной волны. При H -поляризованной волне эшелетт может сконцентрировать практически всю энергию вторичного поля в одной выбранной гармонике (например, автоколлимационное отражение). При этом период решетки примерно одного порядка с длиной волны. При дифракции E -поляризованной волны такое поведение коэффициента отражения не наблюдалось. По этой причине двухзеркальные ОР с эшелеттной решеткой возбуждаются только на H -поляризованных типах колебаний.

Практические задачи в ряде случаев, например использование эшелеттов в оротроне [1] или построение многозеркальных ОР [2], требуют возбуждения E -поляризованных колебаний. В ОР, в котором одно из зеркал выполнено в виде уголково-эшелеттного зеркала [3], возбуждение E -поляризованных колебаний стало возможным благодаря использованию эффекта “запертых колебаний”, при котором дифракция электромагнитной волны на решетке не учитывается. В трехзеркальном ОР [4] возможно возбуждение как H -, так и E -поляризованных колебаний, однако в последнем случае эшелетт работает в режиме зеркального отражения и на частоте возбуждения его можно заменить эквивалентным плоским зеркалом. Перечисленные ОР с эшелеттными зеркалами не исчерпывают возможных вариантов построения ОР с дифракционными эшелеттными решетками. Многозеркальные ОР относятся к классу резонаторов с дополнительным ограничением резонансного пространства [5], в которых наблюдается изменение спектров и добротности некоторых возбуждаемых колебаний.

Целью статьи является аналитическое и экспериментальное исследование спектров и топологии полей многозеркального ОР.

2. КОНСТРУКЦИЯ РЕЗОНАТОРА

Четырехзеркальный открытый резонатор [6, 7] образован четырьмя отражателями: боковым 1 и верхним 2 сферическими зеркалами, эшелеттным 3 и плоским 4 зеркалами (рис. 1).

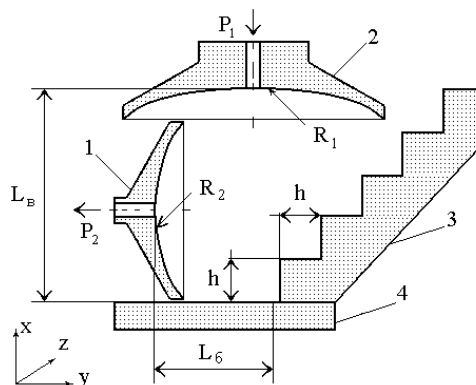


Рис. 1 – Конструкция резонатора

Он состоит из двух открытых резонаторов (ОР 1 и ОР 2). ОР 1 состоит из верхнего сферического зеркала 2 со следующими параметрами: диаметр апертуры $2a = 40$ мм, срез сегментов до 36 мм, радиус кривизны $R = 110$ мм; эшелеттного зеркала 3 (отражающая поверхность которого выполнена в виде дифракционной решетки с прямоугольными ступенями) и плоского зеркала 4. Эшелеттное зеркало расположено на плоском зеркале на расстоянии 2,1 мм от оси резонатора. ОР 2 состоит из бокового сферического зеркала 1 со следующими параметрами: диаметр апертуры $2a = 40$ мм, срез сегментов до 19 мм, радиус кривизны $R = 80$ мм и эшелеттного зеркала 3. В центральной части сферических зеркал выполнены щели связи сечением $0,15 \times 7,2$ мм, переходящие в волновод стандартного сечения для связи резонатора с внешними устройствами. Т.е., в четырехзеркальном ОР образуется электродинамическая структура, состоящая из двух взаимосвязанных сферо-эшелеттных ОР. Связь между возбуждаемыми колебаниями в ОР осуществляется эшелеттным зеркалом. Управление характеристиками четырехзеркального ОР можно осуществлять перемещением верхнего и бокового зеркал как одновременно, так и перемещением каждого зеркала в отдельности [8, 9].

Для проведения исследований четырехзеркальный ОР включался по схеме «на проход»: резонатор запитывался через верхнее (P_1), а съём информации производился через боковое (P_2) сферическое зеркало.

3. АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ В РЕЗОНАТОРЕ

На основе программы, описанной в [10], построена математическая модель открытого резонатора с тремя цилиндрическими зеркалами. Зеркала рассматриваемого ОР моделируются бесконечно тонкими идеально проводящими незамкнутыми экранами. Образующие экранов параллельны оси OZ и вдоль неё экраны бесконечны и однородны. Сечение ОР плоскостью XOY даёт систему трёх односвязных гладких контуров L_1 , L_2 и L_3 конечной длины (обозначены на рис. 3), где L_1 и L_2 – дуги окружностей, а L_3 составлен из отрезка прямой и эшелетта. Контур L_1 , L_2 и L_3 рассматриваются, как части замкнутых достаточно гладких контуров с поверхностями S_1 , S_2 и S_3 после того как острые углы ломанных сглажены дугами окружностей достаточно малых радиусов. Рассмотрены двумерные E -поляризованные колебания для которых, $d/dz \equiv 0$, а вектор напряженности электрического поля \vec{E} имеет только компоненту $E_z \neq 0$ ($E_x = E_y = 0$). Далее ставилась соответствующая спектральная задача о собственных E -поляризованных колебаниях. После регуляризации в конечном итоге приходим к решению бесконечной системы линейных алгебраических уравнений второго рода. Эта система позволяет корректно (в алгоритмическом смысле) в области используемых параметров перейти к решению уже конечной системы линейных алгебраических уравнений. Подробно данная процедура описана в [10]. Решая систему, определяем E_z -компоненту напряженности электрического поля. Остальные компоненты определяются из уравнений Максвелла.

Представленная модель соответствует трехмерному ОР (рис. 1), где левое 1 и верхнее 2 зеркала – сферические сегменты L_1 , L_2 , а два остальных зеркала 3, 4 в сечении совпадают с третьим зеркалом модели L_3 . Проведем анализ распределения амплитуды поля внутри ОР. В математической модели поле возбуждается линией тока параллельной образующим цилиндрических поверхностей.

На рис. 2 приведены характеристики перестройки частоты ОР с изменением расстояния между боковым и эшелеттным зеркалами при фиксированном расстоянии (22 мм) между плоским и верхним зеркалами. При изменении расстояния между зеркалами на 7 мм частота изменяется на 8 ГГц. При этом в резонаторе возбуждаются 12 типов колебаний. Точками обозначены результаты экспериментальных измерений, сплошными линиями представлены спектральные кривые полученные с помощью описанной выше математической модели. Для удобства изложения спектральные кривые условно перенумерованы. Так же, чисто условно, в рамках данной работы, будем именовать соответствующие типы колебаний. Из рисунка видно, что экспериментальные точки достаточно хорошо коррелируют с расчетными кривыми.

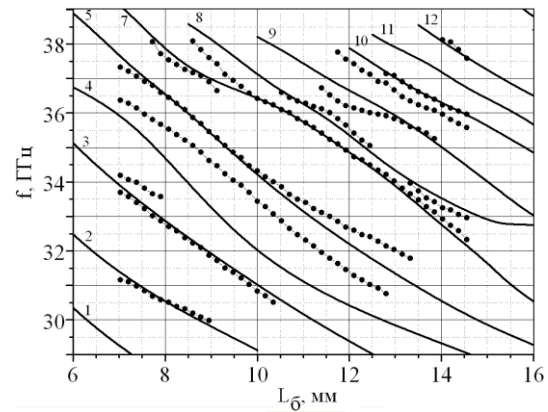


Рис. 2 – Спектры колебаний исследуемого ОР при перестройке его боковым зеркалом

Рассмотрим распределение амплитуд в точках $L_δ = 7.2, 8.5, 10.3$ мм «3-го типа» колебаний – рис. 3, 4 и 5 соответственно. Из рисунков видно, как и отмечалось выше, что классификация колебаний для такого ОР весьма затруднительна. Несмотря на то, что эти точки принадлежат одному типу колебаний и структуры полей во многом схожи (расположение пятен поля), однако по диапазону перестройки существенно меняется распределение поля. Так можно считать, что максимум интенсивности поля при $L_δ = 7.2$ мм расположено вблизи бокового зеркала, в точке оно несколько уменьшилось, в то время, как пятно на верхнем зеркале увеличилось. В точке $L_δ = 10.3$ мм доминирующее пятно опять в области бокового зеркала.

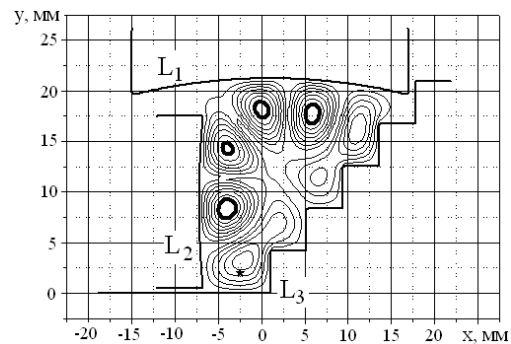


Рис. 3 – «3-й тип» колебаний. $L_δ = 7.2$ мм

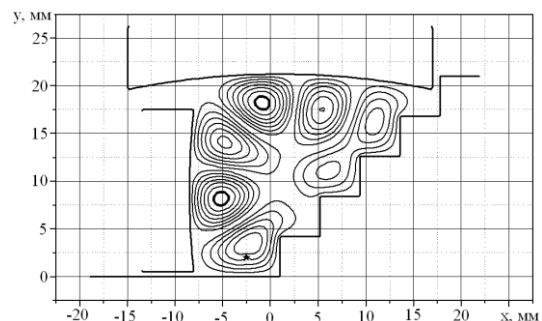


Рис. 4 – «3-й тип» колебаний. $L_δ = 8.5$ мм

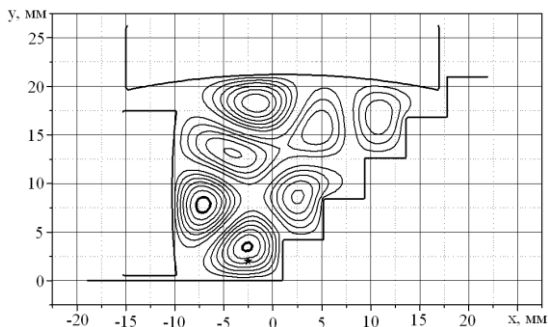


Рис. 5 – «3-й тип» колебаний. $L_{\delta} = 10.3$ мм

Сложность распределения поля внутри ОР в первую очередь обусловлена существенной несимметрией ОР. Поэтому при анализе полей остановимся на следующих случаях:

- а) поле сосредоточено у бокового зеркала (вблизи его оси);
- б) поле сосредоточено у верхнего зеркала (вблизи его оси);
- в) поле сосредоточено у эшелетта.

Отметим, что именно случаи а) и б) представляют наибольший интерес для реальных ОР описанного вида. Примером поля, сосредоточенного около бокового зеркала, может служить распределение амплитуд на рис. 5. На рис. 6 представлено распределение амплитуд при $L_{\delta} = 10.1$ мм «7-й тип» колебаний с концентрацией поля в области центра верхнего зеркала.

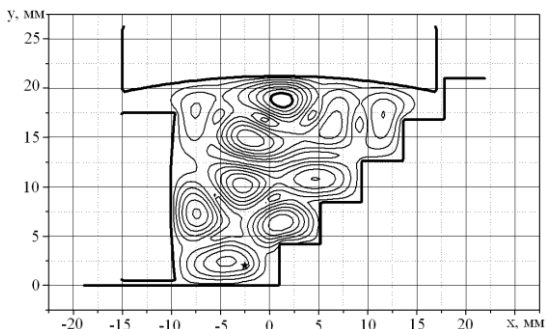


Рис. 6 – «7-й тип» колебаний. $L_{\delta} = 10.1$ мм

Как уже отмечалось выше, в эксперименте ОР включался по схеме «на проход»: резонатор запитывался через верхнее, а съём информации производился через боковое сферическое зеркало. Для работы в подобном режиме может представлять интерес распределение поля приведенное на рис. 3, где имеем поле сконцентрированное вблизи щелей связи обоих сферических зеркал. При включении же ОР по схеме «отражения» можно ограничиться одной щелью связи (например, на верхнем зеркале). Тогда требования к распределению поля существенно уменьшаются. Требуется только удачное расположение пучности поля в области верхнего зеркала. Правда при такой схеме включения возрастает нагрузка на канал связи и щель.

Рассмотрим ещё случай распределения полей представленное на рис. 7 («8-й тип» колебаний при $L_{\delta} = 11.7$ мм) здесь поле в областях щелей связи минимально, а максимальная его концентрация сосредоточена в области эшелетта.

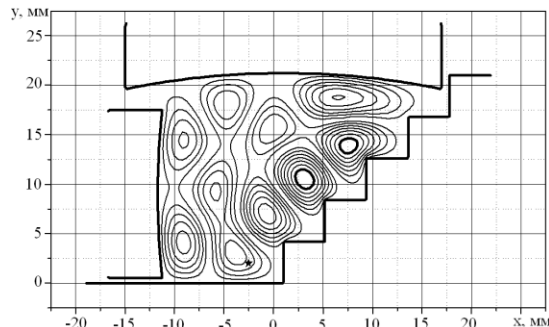


Рис. 7 – «8-й тип» колебаний. $L_{\delta} = 11.7$ мм

В этом случае для эффективной работы ОР имело бы смысл расположить щель связи на эшелетте. Отметим, что дифракционная добротность (расчетная) этого колебания наивысшая из всех приведенных здесь случаев ($\log Q = 2$).

Далее рассмотрим колебания с распределением амплитуды поля представленном на рис. 8 («9-й тип» колебаний при $L_{\delta} = 12.3$ мм).

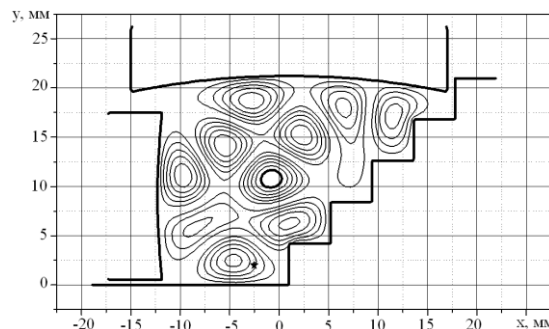


Рис. 8 – «9-й тип» колебаний. $L_{\delta} = 12.3$ мм

Здесь поле сосредоточено вдали от зеркал и поэтому не может быть эффективно выведено из ОР. При этом расчетная дифракционная добротность резонатора в таком режиме достаточно велика ($\log Q = 2.75$). На наш взгляд работа ОР в таком режиме при достаточно затрудненном вводе – выводе энергии приведет к увеличению омических потерь. При этом энергия будет выводиться неэффективно в виде тепла через корпус прибора.

Наконец обратимся к рисункам распределения амплитуд поля «4-го типа» колебаний (рис. 9 и 10). Видно, что здесь распределение амплитуд поля подобно рис. 7 с еще большей концентрацией в области

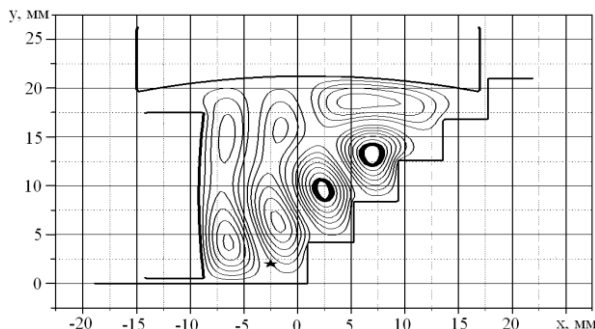


Рис. 9 – «4-й тип» колебаний. $L_{\delta} = 9.2$ мм

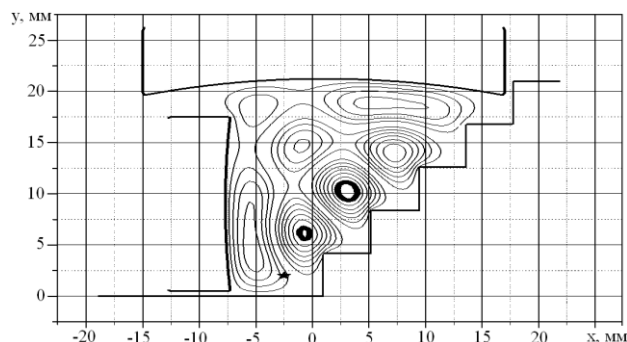


Рис. 10 – «4-й тип» колебаний. $L_0 = 7.72$ мм

эшелетта. Колебания такого типа даже имея достаточно высокую дифракционную добротность (расчетную) при использованной нами схеме ввода – вывода энергии не могут быть эффективно использованы в реальном приборе.

Именно этим можно объяснить то, что соответствующие колебания не были обнаружены в эксперименте (см. рис. 2).

Open Multimirror Resonator with Echelette Mirror

O.I. Belous, V.G. Dudka, V.K. Korneenkov, O.N. Sukhoruchko, A.I. Fisun

*A. Usikov Institute of Radio Physics and Electronics, National Academy of Sciences of Ukraine
12, Academician Proskura St., 61085 Kharkiv Ukraine*

E-polarized oscillations in open multimirror resonator have been investigated. One of the mirrors of the open resonator is defined as an echelette grating with equal steps. Spectra and field topology of the *E*-polarized oscillations of resonator are derived theoretically and experimentally at 8 mm wave band.

Keywords: Millimeter waves, Open resonator, Echelette mirror, Spectrum of oscillations, Field topology.

Багатодзеркальний відкритий резонатор з ешелеттним дзеркалом

О.І. Білоус, В.Г. Дудка, В.К. Корнеєнков, О.М. Сухоручко, А.І. Фісун

Інститут радіофізики та електроніки НАН України, вул. ак. Проскури, 12, 61085 Харків, Україна

В роботі досліджені *E*-поляризовані коливання багатодзеркального відкритого резонатора, одне з дзеркал якого представляє собою ешелетт з рівними гранями. Аналітично і експериментально отримані спектри і топології поля *E*-поляризованих коливань резонатора 8 мм діапазоні довжин хвиль.

Ключові слова: Міліметровий діапазон довжин хвиль, Відкритий резонатор, Ешелеттне дзеркало, Спектр коливань, Топологія поля.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

- O.I. Belous, A.I. Fisun, A.A. Kirilenko, *Int. J. Infrared Milli.* **18**, 445 (1997).
- В.П. Шестопапов, А.А. Кириленко, С.А. Масалов, Ю.К. Сиренко *Резонансное рассеяние волн. Т. 1. Дифракционные решетки* (Киев: Наук. думка: 1986).
- А.И. Фисун, О.И. Белоус, *Зарубежная электроника. Успехи современной радиоэлектроники* **4**, 41 (1998).
- А.М. Фурсов, Б.М. Булгаков, А.И. Фисун *Известия вузов СССР. Радиоэлектроника* **26** № 10, 80 (1983).
- A.I. Fisun, *Int. J. Infrared Milli.* **18**, 12, 2353 (1997).
- О.И. Белоус, В.К. Корнеєнков, О.Н. Сухоручко, А.И. Фисун, *16-я Международная конференция – СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо-2006)*, 559 (Севастополь: Вебер: 2006).
- V.K. Korneenkov, O.N. Sukhoruchko, O.I. Belous, A.I. Fisun, *Telecomm. Radio Eng.* **65**, 1585 (2006).
- O.I. Belous, A.I. Fisun, V.K. Korneenkov, O.N. Sukhoruchko. *The Sixth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'07)*, 729 (Kharkov: 2007).
- О.И. Белоус, В.К. Корнеєнков, О.Н. Сухоручко, А.И. Фисун, *Радиотехника* **149**, 18 (2007).
- М.Ю. Демченко, В.К. Корнеєнков, В.С. Мирошниченко, А.Е. Поединчук, Ю.В. Свищев, Ю.А. Тучкин, *Радиофизика и электроника* **5**, 19 (2000).