

Четырехзеркальный открытый резонатор с канавкой на плоском зеркале

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

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

(Получено 15.01.2014; в отредактированной форме – 06.05.2014; опубликована online 20.06.2014)

В работе исследованы E-поляризованные колебания четырехзеркального открытого резонатора, 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. Приведены результаты экспериментального исследования макета генератора дифракционного излучения, созданного на основе исследуемого открытого резонатора.

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

PACS numbers: 07.57. – c, 42.60.Da

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение высокочастотных открытых резонаторов (ОР) в качестве колебательного СВЧ-контура обратной связи позволило создать когерентные источники средней мощности мм диапазона длин волн – генератор дифракционного излучения (ГДИ), оротрон, лазер на свободных электронах, ледатрон и т.п. [1]. Однако, недостаточная селекция колебаний в сфероцилиндрических и других ОР, используемых в ГДИ, не позволяет повышать мощность генераторов без ухудшения спектральных характеристик по следующим причинам: мощные источники работают при значительном превышении рабочего тока над пусковым, что способствует одновременному возбуждению генерации не только на основном, но и на высших близлежащих типах колебаний; с ростом КПД происходит расширение зон электронной перестройки по напряжению для каждого из возбуждаемых колебаний и наблюдается частичное перекрытие зон генерации. В целом это препятствует достижению максимальной генерируемой мощности в зоне электронной перестройки и вызывает нарушение устойчивости генерации. Эта проблема может быть решена путем дополнительного разрежения спектра колебательной системы при сохранении высокой добротности. Вместе с этим, используя резонаторы с дополнительным разрежением спектра, можно добиться увеличения выходной мощности и КПД, уменьшения пускового тока, а также улучшить устойчивость генерации [2].

Целью работы является аналитическое и экспериментальное исследование спектров и топологии полей четырехзеркального ОР, одним из зеркал которого является эшелетт, а также макета ГДИ, выполненного на основе данного резонатора.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОР

Для построения электродинамической модели рассмотрим граничную задачу Дирихле. Зеркала рассматриваемого ОР моделируются бесконечно тонкими идеально проводящими незамкнутыми цилиндрическими экранами. Образующие экранов параллельны оси OZ и вдоль нее экраны бесконечны и однородны. Сечение ОР плоскостью XOY представлено системой из трех односвязных гладких контуров L_j , $j = 1, 2, 3$

конечной длины. Геометрия направляющих представлена на рис.1, где плоское зеркало, канавка на нем и эшелетт моделируются одним контуром L_3 .

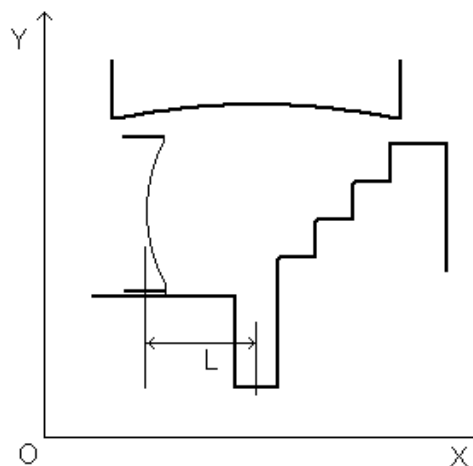


Рис. 1 – Геометрия ОР

Полагается, что L_j , $j = 1, 2, 3$ части замкнутых, достаточно гладких контуров S_j , $j = 1, 2, 3$, причем

$$\bigcap_{j=1}^3 S_j = \emptyset$$

Изложение основных идей метода проще проводить, ограничившись предположением, что контуры S_j – бесконечно гладкие:

$$S_j \in C^\infty, j = 1, 2, 3.$$

Однако, используемые процедуры аналитической регуляризации соответствующей спектральной задачи могут быть осуществлены и при существенно более слабых предположениях, например при $S_j \in C^{2,\alpha}$ [3].

Соответственно сохраняют силу и основные результаты. При этом, вычислительная эффективность развитых алгоритмов, а также возможность их эффективной программной реализации существенно возрастают при повышении гладкости S_j .

Будем рассматривать двумерные E- поляризован-

ные колебания ОР, т.е. колебания для которых $\partial/\partial z \equiv 0$ и вектор напряженности электрического поля \vec{E} имеет только $E_z \neq 0$, а $E_x = E_y = 0$. Для решения поставленной задачи использован метод, описанный в [4, 5]. В качестве источника первичного поля используется линия тока, параллельная образующим цилиндра. Ее положение обозначено на рисунках звездочкой.

Результаты численного моделирования приведены на рис. 2. Сплошными линиями изображены спектральные кривые, представляющие зависимость собственной частоты от расстояния между центром канавки и вершиной бокового зеркала, где L – расстояние от вершины бокового зеркала до середины канавки. Они получены с помощью используемой математической модели. Данный ОР, в отличие от рассмотренного в [4], имеет канавку на плоском зеркале, которая моделирует излучающий элемент реального прибора (решетку с электронным пучком).

Идентификация типов колебаний в ОР, состоящих из двух зеркал, как правило, осуществляется по количеству вариаций поля вдоль оси резонатора (продольный индекс) и в плоскости, перпендикулярной оси резонатора (поперечные индексы) [5]. Как показали численные расчеты, распределение поля в рассматриваемом ОР носит существенно нерегулярный характер. Поэтому такой подход к классификации типов колебаний представляется весьма проблематичным. Эту ситуацию можно объяснить, рассматривая описываемый ОР как систему двух парциальных резонаторов: 1) верхнее зеркало и эшелетт; 2) боковое зеркало и эшелетт, связанные через эшелетт. При этом собственные колебания обоих резонаторов, взаимодействуя между собой, образуют собственные колебания в целом. Добавим еще существенную несимметричность данного ОР.

Для удобства дальнейшего изложения материала условно назовем тип колебания резонатора соответственно номеру кривой на рис. 2. Объем статьи не позволяет привести весь графический материал, поэтому ограничимся описанием и демонстрацией замеченных закономерностей. Замечено, что на участках спектральной кривой с меньшей кривизной структура поля при перестройке ОР изменяется меньше, чем на участках с большей кривизной. В простейших случаях число и расположение пучностей в основном остается постоянным для данного типа колебаний, но при перестройке поле перераспределяется, как бы дрейфуя в объеме ОР, включая максимальную пучность поля.

Продемонстрируем отмеченные свойства на спектральных кривых 2, 3, 4, имеющих достаточно гладкий характер и разнесенных между собой по частоте. Для колебания «тип 2» характерное распределение амплитуды в объеме ОР представлено на рис. 3.

Анализируя структуру поля, отметим, что:

- а) поле колебания «тип 2» содержит 5 пятен (пятно в канавке здесь и далее не учитывается)
- б) с увеличением L пятно с 1-й ступени перемещается внутрь резонатора, достигая максимального значения
- в) пятно поля в канавке несколько из нее выплывает.

Картина поля колебания «тип 4» представлена на рис. 4.

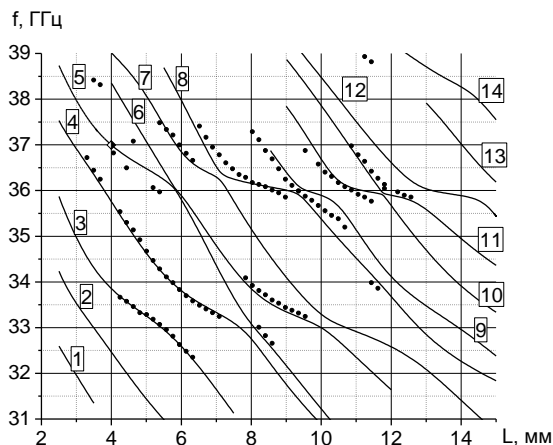


Рис. 2 – Зависимость частоты ОР от длины резонатора L

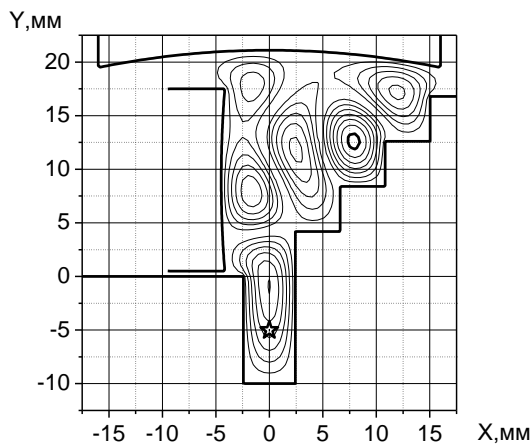


Рис. 3 – «2-й тип» колебаний, $L = 4,7$ мм

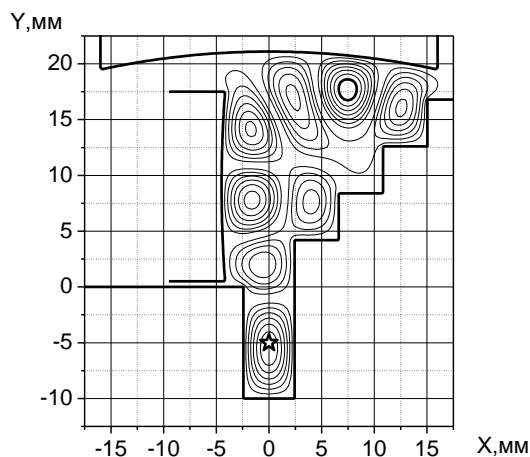


Рис. 4 – «4-й тип» колебаний, $L = 4,5$ мм

Здесь наблюдается 7-мь пятен поля: по 3-и пятна на боковом и верхнем зеркалах и одно на эшелетте. При увеличении L (на наблюдаемом интервале) был замечено, что пятно на эшелетте меняет свое положение: сначала оно между 1-й и 2-й ступенями, потом 1-я ступень и наконец 2-я ступень. Структура поля колебания «тип 3» носит, примерно, тот же характер, что и поля колебаний 2 и 4 типов. Анализируя распределение полей перечисленных колебаний и ход соответствующих им кривых на рис. 2, отме-

тим, что в их формировании участвуют все элементы многозеркального ОР и по природе своей их следует отнести к типам колебаний, свойственных многомодовым объемным резонаторам, т.е. дифракционные явления на краях зеркал [2] слабо сказывается на формировании структуры поля.

Описанные выше структуры полей приведены не столько с целью классификации, сколько для демонстрации сложности таковой. В отличие от ОР, рассмотренного в [2], в нашем случае имеется ряд особых точек (см. рис. 2), где спектральные кривые резко сближаются. Это линии 5 и 6, 7 и 8, 8 и 9, 10 и 11 при частоте в районе 36 ГГц. Кроме этого можно выделить еще две, менее выраженные, точки-линии 4 и 5, 6 и 7 на частоте примерно 33 ГГц. На рис.2 области межмодового взаимодействия [6] очерчены окружностями. Вдали от особых морсовых точек поля «10-типа» и «11 типа» колебаний носят характер стоячей волны вдоль оси «канавка – верхнее сферическое зеркало» (см. рис.5 и 6). Отличие от классического поля TE_{00q} , в данном случае, заключается в дополнительной деформации поля эшелеттом, как дисперсионным элементом. Боковое сферическое зеркало практически не влияет на структуру поля и перестройку частоты при приближении к морсовской критической точке. Как видно из рис. 2, при приближении к области взаимодействия наклон кривых перестройки частоты минимален. В самой критической морсовской точке структура поля существенно меняется. Поля колебаний «10 и 11 типов» претерпевают взаимное влияние.

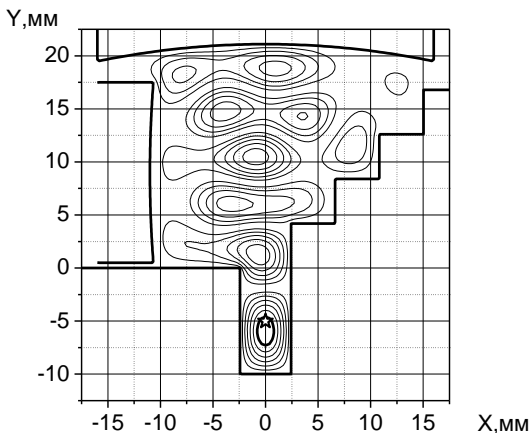


Рис. 5 – «10-й тип» колебаний, $L = 11,0$ мм

Из рис. 5, 6 и 7 видно, как с увеличением L тип колебания 10 переходит в 11, а 11 в 10. Распределения полей в самой особой точке для разных типов кардинально отличаются, как между собой, так и от полей вдали от нее на обеих линиях. Как и следовало ожидать, при удалении от особой точки характер распределения поля на соответствующей кривой меняется, причем у каждого типа колебания по-своему.

Проводился анализ распределения полей в окрестности другой особой точки: (колебаний «8 и 9 типа» при $L = 9.5$ мм), который показал, что в этой точке так же происходит междутиповой обмен. Характер соответствия полей подобен предыдущей особой точке.

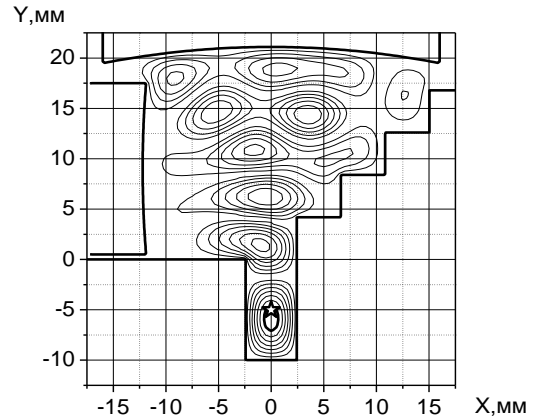


Рис. 6 – «11-й тип» колебаний, $L = 12,21$ мм

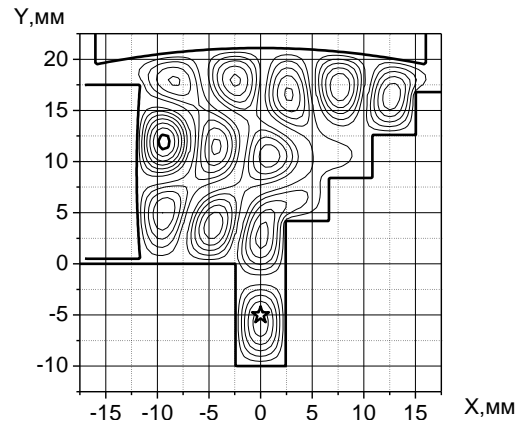


Рис. 7 – «10-й тип» колебаний, структура поля в критической точке, $L = 12,0$ мм

В остальных особых точках анализ не проводился, так как в их окрестности отсутствует достаточное число экспериментальных данных, которые на рис. 2 обозначенных точками. Отсутствие экспериментального исследования колебаний можно объяснить разнообразием вариантов распределения поля в объеме ОР (в частности, когда поле минимально в области каналов вывода энергии прибора). Такой режим колебания наблюдался в модели ОР, но его трудно обнаружить в эксперименте. При этом, дифракционная добротность такого колебания, полученная теоретически, может быть достаточно высокой. Пример распределения поля такого типа представлен на рис. 8.

Как уже отмечалось, при изменении частоты структура поля в ОР существенно изменяется. Меняются относительные амплитуды пятен поля. А максимальное значение как бы дрейфует от одного пятна к другому. Очевидно, что эффективность работы прибора существенно зависит от близости пятна с максимальной амплитудой к каналу связи, что можно увидеть только на модели.

Так, на частоте 36,05 ГГц максимальная концентрация энергии расположена вблизи центральной части верхнего зеркала, а минимальная – вблизи бокового зеркала и третьей ступеньки эшелеттного зеркала. На частоте $f = 35,19$ ГГц (рис. 9) максимальная концентрация энергии наблюдается вблизи третьей ступеньки эшелетта, а минимальная – вблизи бокового и верхнего зеркал. Эти данные можно

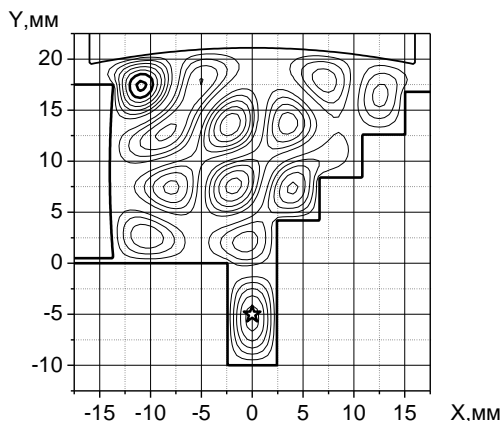


Рис. 8 – «11-й тип» колебаний, $L = 14,0$ мм

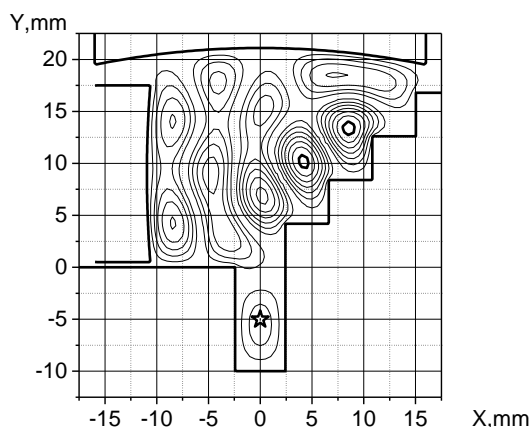


Рис. 9 – «9-й тип», $f = 35,19$ ГГц

использовать для размещения отверстий связи для вывода энергии или для размещения на эшелетте диодов Ганна или ЛПД [7] в твердотельных квазиоптических генераторах для получения оптимального КПД (см. рис. 9, где поле сконцентрировано вблизи эшелетта). Таким образом, при прохождении области критической точки наблюдается закономерное преобразование структуры поля, как и в случае взаимодействия «10 и 11 типов». Здесь же проиллюстрировано взаимодействие «8 и 9 типов» колебаний.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ. ГДИ С ЧЕТЫРЕХЗЕРКАЛЬНЫМ ОР

На основании проведенных теоретических исследований характеристик данного ОР, а также исследования его в «холодном режиме» [3], разработан макет ГДИ в 8-мм диапазоне длин волн с тремя выводами энергии. Электродинамическая открытая система представлена схематически на рис. 1. На плоском зеркале вместо канавки расположена периодическая структура, выполненная в виде двух встречных решеток, расположенных на расстоянии $\Delta = 0,2$ мм таким образом, чтобы ламели одной решетки располагались против ламелей другой, а щели этих решеток образуют элементарные волноводы с раскрытием в объем резонатора. Размеры широких стенок элементарных волноводов соответствуют ширине канавки на плоском зеркале, а глубина канавки соответствует длине волноводов. В канале между решетками пролетает электронный

поток. Верхнее и боковое зеркала могут перемещаться относительно плоского и эшелеттного зеркал и имеют щели связи в центральных частях зеркал размерами $0,15 \times 7,2$ мм², переходящие в стандартные волноводы. В эшелеттном зеркале на третьей ступени выполнено круглое отверстие связи, которое согласуется со стандартным волноводом при помощи диэлектрического волновода.

Выходная СВЧ мощность макета ГДИ измерялась из каждого вывода энергии одновременно самокалибрующими головками измерителей мощности типа «Мегот» с измерительным блоком Я2М-66 ваттметра. Точность измерения составляла ± 5 %. Частота генерации в постоянном режиме измерялась электронно-счетным частотомером типа ЧЗ-66, в импульсном режиме оценивалась резонансным волномером. Ускоряющее напряжение измерялось электронным вольтметром типа В7-34 с делителем напряжения типа Р-35.

Практический интерес представляло исследование макета ГДИ с фиксированным расстоянием 22 мм между верхним и плоским зеркалами с перестройкой боковым зеркалом. При перемещении бокового зеркала на 12 мм генератор перестраивается в диапазоне частот 32,5-38 ГГц. При этом ускоряющее напряжение изменяется от 2,3 до 2,8 кВ. На рис. 2 точками приведен спектр возбуждаемых колебаний ГДИ при комбинированной перестройке частоты. Резонансные расстояния возбуждаемых колебаний качественно согласуются с расчетными значениями. Крутизна комбинированной перестройки частоты в 1,5-2 раза меньше обычных ГДИ и составляет 660 МГц/мм, что свидетельствует об улучшении спектра сигнала.

На рис. 10 представлена выходная мощность при перестройке по диапазону колебания «тип 8» (см. рис. 2) при рабочем токе $I = 50$ мА.

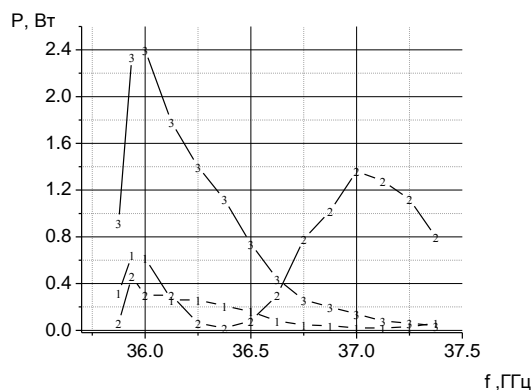


Рис. 10 – Зависимость выходной мощности от частоты колебания «тип 8»

Из рисунка видно как изменяется выходная мощность, излучаемая из бокового зеркала (кр.1) и (кр.2, 3) – соответственно, из эшелеттного и верхнего зеркал. Выходная мощность, излучаемая из верхнего зеркала максимальная в длинноволновой части диапазона и составляет 2,4 Вт, а из эшелеттного зеркала выше в коротковолновой части колебания и составляет 1,2 Вт для данного типа колебаний. Перераспределение выходной мощности, выводимой через отверстия связи, расположенные на разных

зеркала, подтверждает перераспределение структуры поля колебаний «тип 8» при перестройке частоты боковым зеркалом.

На рис. 11а для колебания «тип 4» на $f = 35,01$ ГГц и на рис. 11б для колебания «тип 9» на $f = 35,6$ ГГц показаны зависимости выходной мощности из эшелеттного (кр. 1), бокового (кр. 2) и верхнего (кр. 3) зеркал от рабочего тока.

Из графиков видно, что для колебания «тип 4», рис. 11а, выходная мощность, излучаемая из верхнего зеркала, составляет 10,5 Вт и бокового зеркала 6,5 Вт, а для колебания «тип 9», рис. 11б, выходная мощность из эшелеттного зеркала составляет 17,5 Вт при $I = 120$ мА, что также хорошо согласуется распределением поля указанных типов колебаний (см. рис. 4 и 9, соответственно). Поскольку эти зависимости сняты при фиксированных частотах, перераспределения мощности не наблюдается.

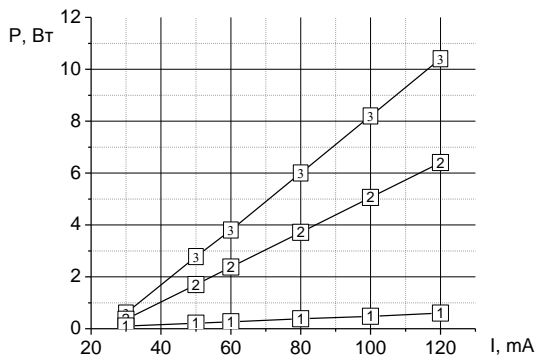


Рис. 11а – Зависимость выходной мощности от тока колебания «тип 4» на частоте $f = 35,01$ ГГц

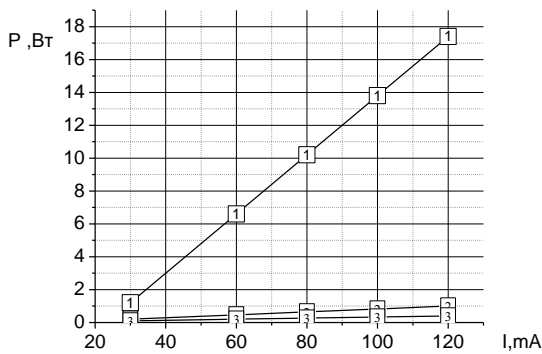


Рис. 11б – Зависимость выходной мощности от тока колебания «тип 9» на $f = 35,6$ ГГц

На рис. 12 для колебания «тип 9» при частоте $f = 34,5$ ГГц показаны зависимости выходной мощности, излучаемой из верхнего (кр. 2), эшелеттного (кр. 3), бокового (кр. 4) зеркал и частоты генерации

(кр. 1) от ускоряющего напряжения при электронном токе $I_p = 90$ мА.

Крутизна электронной перестройки составляет 0,22 МГц/В, что в 2 раза меньше, чем в известных ГДИ [2,8]. Следует отметить, общее уменьшение выходной мощности (рис.12) при $\Delta V > 250$ В, что, по видимому, связано с насыщением тока электронной пушки макета ГДИ.

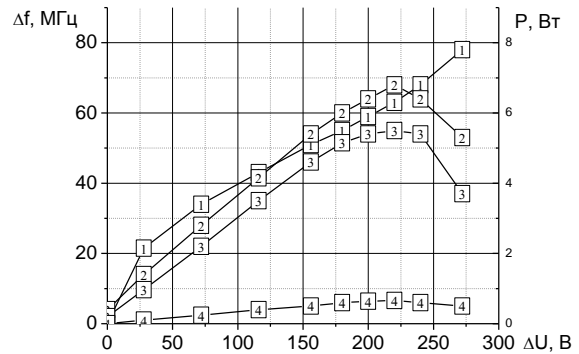


Рис. 12 – Зависимость выходной мощности от частоты колебания «тип 3» на $f = 34,5$ ГГц

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

- 1) сравнение результатов теоретического анализа с экспериментальными измерениями дали хорошее совпадение, несмотря на упрощения при моделировании;
- 2) анализ распределения амплитуды поля внутри ОР показал, что его архитектура существенно меняется при изменении частоты (или положения зеркала) на конкретной спектральной кривой, что связано со сложной конструкцией резонатора, одно из зеркал которого (эшелетт) обладает частотной дисперсией;
- 3) в исследуемом резонаторе вблизи морсовских критических точек наблюдается обмен типами колебаний, что вызвано сложной структурой резонатора. В работе продемонстрировано, что в достаточно близкой области особой точки распределение амплитуд для взаимодействующих типов меняются местами;
- 4) поскольку экспериментальное исследование поля внутри ОР весьма проблематично, то его исследование на модели может быть полезным для выбора типа колебания, на котором достигается максимальная выходная мощность или стабильность частоты генерации. Таким образом можно прогнозировать параметры, при которых максимальное пятно поля близко к элементу связи с нагрузкой.

Open Multimirror Resonator with Groove at the Plane 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, Acad. Proskura Str., 61085 Kharkiv, Ukraine*

E-polarized oscillations in the 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 topologies of the E-polarized oscillations of resonator are obtained theoretically and experimentally in 8 mm wave band. The results of the experimental investigation of breadboard model of diffraction radiation oscillator (DRO) with the open resonator under consideration have been presented.

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

Чотирихдзеркальний відкритий резонатор з канавкою на плоскому дзеркалі

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 Е-поляризовані коливання чотирихдзеркального відкритого резонатора, одне з дзеркал якого представляє собою ешелетт з рівними гранями. Аналітично та експериментально отримані спектри і топології поля Е-поляризованих коливань резонатора у 8-мм діапазоні довжин хвиль. Приведені результати експериментального дослідження макета генератора дифракційного випромінювання, створеного на основі даного резонатора.

Ключові слова: Міліметровий діапазон довжин хвиль, Відкритий резонатор, Ешелеттне дзеркало, спектр коливань, Топологія поля, Генератор дифракційного випромінювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. *Генераторы дифракционного излучения* (Под ред. В.П. Шестопалова) (К: Наук. Думка: 1991).
2. O.I. Belous, A.I. Fisun, F.A. Kirilenko, V.K. Korneenkov, V.S. Miroshnichenko, *Int. J. Infrared Millimeter Waves* **18** No 2, 445 (1997).
3. О.И. Белоус, В.Г. Дудка, В.К. Корнеєнков, О.Н. Сухоручко, А.И. Фісун, *Ж. нано- електрон. фіз.* **4** No 4, 04019 (2012) (O.I. Belous, V.G. Dudka, V.K. Korneenkov, et al., *J. Nano- Electron. Phys.* **4** No 4, 04019 (2012)).
4. В.П. Шестопалов, Ю.А. Тучкин, А.Е. Поєдинчук, Ю.К. Сиренко, *Новые методы решения прямых и обратных задач теории дифракции. Аналитическая регуляризация краевых задач электродинамики* (Харків: ОСНОВА: 1997).
5. Л.А. Вайнштейн, *Открытые резонаторы и открытые волноводы* (М.: Сов. Радио: 1966).
6. В.П. Шестопалов, *Морсовские критические точки дисперсионных уравнений* (К.: Наук. Думка: 1962).
7. О.И. Белоус, А.И. Фісун, *Успехи современной радио-электроники* № 4, 41 (1999).
8. М.Ю. Демченко, В.К. Корнеєнков, В.С. Мирошніченко, А.Е. Поєдинчук, Ю.В. Свищев, Ю.А. Тучкин, *Радиофизика и электроника* 5 №3, 19 (2000).