

О. И. Белоус, В. Л. Пазынин, О. Н. Сухоручко, А. И. Фисун
 Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
 12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
 E-mail: obel@ire.kharkov.ua

АЗИМУТАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В КВАЗИОПТИЧЕСКОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ

Квазиоптические диэлектрические резонаторы широко используются в современной микроволновой технике в качестве элементов стабилизации источников излучения, а также в устройствах для исследования электрофизических свойств сред. Они обладают высокой добротностью, удобны в эксплуатации, однако в режиме возбуждения колебаний типа «шепчущей галереи» частотный интервал между соседними азимутальными колебаниями невелик, что не исключает произвольного перескока частоты рабочего типа колебаний на соседние. Целью нашего исследования является теоретическое и экспериментальное исследование возможности разрезания спектра вынужденных азимутальных колебаний «шепчущей галереи» дискового диэлектрического резонатора. Исследовались три типа полудисковых резонаторов – диэлектрический резонатор без каких-либо дополнительных устройств, диэлектрический резонатор с проводящим экраном на цилиндрической поверхности и диэлектрический резонатор с дифракционной решеткой из проводящих лент на боковой цилиндрической поверхности резонатора. Компьютерное моделирование проведено с помощью метода конечных разностей во временной области (*FDTD*). Экспериментальное исследование проведено с использованием стандартного измерителя КСВН в диапазоне частот 8...12 ГГц. Путем компьютерного и натурального экспериментов получены спектры колебаний типа «шепчущей галереи» полудискового резонатора, резонатора с экраном и резонатора с ленточной дифракционной решеткой на боковой поверхности. При коэффициенте заполнения решетки $\theta = 0,3$ получено возбуждение азимутального типа на одной частоте с подавлением соседних типов не менее чем на 15...20 дБ. Метод *FDTD* является адекватным сечным методом в моделировании процессов возбуждения вынужденных колебаний в системах, где колебательные процессы обусловлены дифракцией и формированием стоячих волн. Благодаря использованию дифракционной решетки в дисковом диэлектрическом резонаторе достигнуто практически одночастотное возбуждение колебаний типа «шепчущей галереи» в широком интервале частот. Ил. 7. Библиогр.: 15 назв.

Ключевые слова: диэлектрический резонатор, селекция типов колебаний, подавление типов колебаний.

В области исследований квазиоптических диэлектрических резонаторов к настоящему времени накоплен и обобщен большой научный материал в сверхвысокочастотном (СВЧ), миллиметровом (КВЧ) и оптическом диапазонах длин волн [1–3]. Проведены исследования цилиндрических, дисковых, сферических и других типов резонаторов и их модификаций. Уделено внимание составным резонаторам и резонаторам, изготовленным из анизотропных диэлектриков, полупроводниковых и ферритовых материалов.

Повышенный интерес к изучению электродинамических свойств резонаторов данного типа вызван высокой добротностью и стабильностью, а также приемлемыми размерами в СВЧ-диапазоне (если в качестве материала взяты диэлектрики с высоким значением диэлектрической проницаемости ε и малыми потерями). В КВЧ-диапазоне получили распространение резонаторы, изготовленные из диэлектриков с низкими значениями ε . Диэлектрические резонаторы технологичны в изготовлении, имеется возможность применения диэлектрических резонаторов в СВЧ- и КВЧ-цепях с высокой степенью интеграции. Благодаря полному внутреннему отражению бегущих волн на границе раздела диэлектрик – внешняя среда в резонаторах данного типа возможно возбуждение колебаний типа «шепчущая галерея». Из известных колебательных систем диэлектрические резонаторы, возбуждаемые на колебаниях «шепчущей галереи», имеют наибольшую добротность.

В настоящее время в развитии теоретических и экспериментальных методов анализа электродинамических свойств диэлектрических резонаторов наметилась тенденция конкретизации задач исследований, имеющих непосредственную связь с решением прикладных задач науки и техники. Выделим два основных направления:

- стабилизация частоты твердотельных источников излучения СВЧ- и КВЧ-диапазонов;
- создание фильтров и входных устройств приемно-передающей аппаратуры [1].

Другим важным направлением является исследование электрофизических параметров сильно- и слабопоглощающих веществ, включая и сверхпроводящие. Для этих целей в качестве сенсоров используются диэлектрические резонаторы [4], возбуждаемые на колебаниях «шепчущей галереи» с большими азимутальными числами. Отметим одну характерную особенность. Увеличение радиуса R дискового резонатора относительно длины волны ведет к увеличению добротности. В то же время соседние азимутальные моды сближаются [2] и частотный интервал между смежными колебаниями с индексами n и $n \pm 1$

$$\Delta f_{n-(n-1)} = \frac{c}{2\pi R \sqrt{\varepsilon}}, \quad (1)$$

где c – скорость света; n – азимутальное число.

Вторая особенность заключается в том, что поле вне резонатора спадает по экспоненциальному закону, что требует дополнительных

мер по обеспечению электромагнитной совместимости в реальных устройствах.

Проблема селекции мод диэлектрических резонаторов изучена недостаточно. Номенклатура обозначений типов колебаний диэлектрических резонаторов не так хорошо разработана, как для двухзеркальных открытых и объемных металлических резонаторов [5]. Мы воспользуемся классификацией типов колебаний, введенной в работе [1]. Дискковый резонатор – это частный случай цилиндрического резонатора, если его диаметр $D \gg h$, где h – размер резонатора вдоль оси z (его толщина). Как правило, в дискковом резонаторе $h \approx \lambda$ и аксиальное число $l=1$. Положение элемента связи относительно резонатора определяет число вариаций поля по радиусу $m(r)$, аксиальное число $l(z)$ определяется подбором геометрического размера диска. Таким образом, чтобы в резонаторе возбуждался требуемый обычно низкий $E_{nml}(E_z \neq 0)$ или $H_{nml}(H_z \neq 0)$ тип колебаний, необходимо выбрать способ возбуждения и толщину резонатора. Как правило, эти типы колебаний наиболее добротны, в этом случае $m = l = 1$.

Более сложной является селекция мод по азимутальному числу $n(\varphi)$. Этой проблемы коснулись авторы работы [6], в которой неоднородности (например, проводящие штыри, расположенные за пределами резонатора на расстоянии не более длины волны) влияют на некоторые азимутальные моды, если эта неоднородность попадает в пучность поля данной моды. В работе [7] указано на то, что размещение неоднородностей на боковой поверхности диэлектрического резонатора приводит к снижению добротности из-за дополнительных потерь радиационного характера. Упомянутые работы охватывают широкий спектр физических явлений в диэлектрических резонаторах и направления их прикладного использования, однако задача селекции азимутальных типов колебаний изучена недостаточно.

Целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное исследование возможности разрежения спектра вынужденных азимутальных колебаний дисккового диэлектрического резонатора. Конечной целью является достижение одночастотного режима возбуждения азимутальных колебаний в резонаторе. В качестве селективного элемента предложено использовать дифракционные ленточные решетки на диэлектрической подложке, обладающие свойством преобразования объемных плоских волн в поверхностные [8].

Исследуемая система состоит из дисккового или полудисккового диэлектрического резонатора с известными ε и $\text{tg } \delta$ (рис. 1). На боковой

поверхности размещается периодическая структура из проводящих металлических лент одинаковой ширины [9]. Мы остановились на исследовании полудисккового резонатора из-за возможности постановки численного и макетного экспериментов, поскольку электродинамические характеристики упомянутых вариантов диэлектрического резонатора идентичны [2].

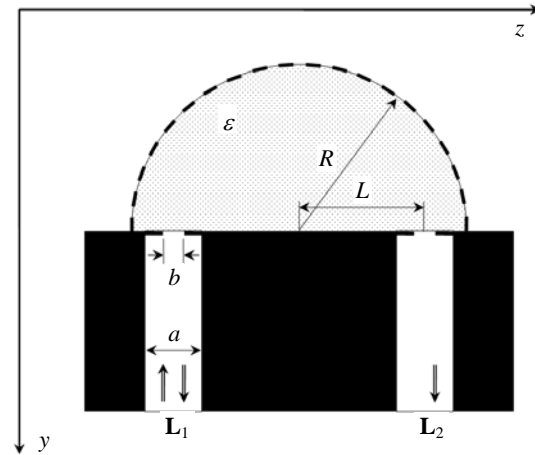


Рис. 1. Геометрия задачи

1. Постановка вычислительного эксперимента. Вычислительные эксперименты, результаты которых представлены в данной работе, были проведены методом конечных разностей во временной области (*FDTD*) [10]. Этот метод универсален, прост в реализации и позволяет моделировать очень широкий класс задач. Однако серьезной проблемой, возникающей при моделировании этим методом открытых задач, является ограничение пространства счета виртуальными границами и выбор на этих границах подходящих «поглощающих» граничных условий (*ABC*). Условия, которые широко известны в литературе [11–12], являются приближенными, т. е. неизбежно вносят погрешность в вычислительную область. Это существенно ограничивает использование *FDTD* метода для расчетов резонансных структур, где поле, уходящее на бесконечность, длительное время взаимодействует с виртуальной границей. При больших временах счета вносимая погрешность накапливается и становится неприемлемо большой; достоверность получаемых результатов становится сомнительной. По этой причине мы использовали оригинальные «поглощающие» граничные условия [13]. Эти условия – точные. Это означает, что они могут сколь угодно долго «взаимодействовать» с полем уходящей волны и не вносить существенной погрешности в вычислительную область. Проведенные ранее исследования и вычислительные эксперименты [14–15] позволяют сделать вывод, что метод

конечных разностей, оснащенный точными «поглощающими» граничными условиями, может быть использован для корректного расчета открытых резонансных систем в том числе для расчета характеристик квазиоптических диэлектрических дисковых резонаторов.

В настоящей работе рассматривается двумерная начально-краевая задача для E -поляризованного поля. Ее геометрия (рис. 1) представляет собой диэлектрический полуцилиндрический резонатор, на поверхность которого нанесена решетка из тонких металлических лент. В вычислительном эксперименте выбрана прямоугольная система координат. Параметры $\varepsilon = 2,1$, $R = 107$ мм, $L = 96$ мм, $a = 23$ мм, $b = 5$ мм. Все вычисления проводятся в системе единиц СИ, только время t нормировано на скорость света в вакууме и измеряется в метрах. Возбуждение резонатора и отвод от него электромагнитной энергии осуществляется посредством двух полубесконечных волноводов (портов \mathbf{L}_1 и \mathbf{L}_2). Характеристики временной области $f(t)$ переводятся в характеристики частотной области $f(k)$ с помощью преобразования Фурье

$$f(k) = \frac{1}{2\pi} \int_0^T F(t) e^{ikt} dt \leftrightarrow F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(k) e^{ikt} dk, \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda = 2\pi/cf$ – волновое число; λ – длина волны в свободном пространстве; c – скорость света в вакууме; f – частота; $t \in [0, T]$ – интервал времени наблюдения.

Первичная волна в порту \mathbf{L}_1 ($\{y = y_1; z_0 \leq z \leq z_1\} \in \mathbf{L}_1$) задается следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} E_x(y_1, z, t) &= v_n(y_1, t) \mu_n(z), \\ \mu_n(z) &= \sqrt{2/a} \sin(n\pi(z - z_0)/a), \quad a = z_1 - z_0, \quad n = 1, \\ v_n(y_1, t) &= A(t) \frac{\sin(\Delta k(t - \tilde{T}))}{t - \tilde{T}} \times \\ &\times \cos(\tilde{k}(t - \tilde{T})) \chi(t) \chi(T - t), \end{aligned} \quad (3)$$

$$A(t) = \begin{cases} 4(-2x^3 + 3x^2), & t_0 \leq t \leq t_1 \\ 4(-2\tilde{x}^3 + 3\tilde{x}^2), & t_1 \leq t \leq t_2, \end{cases}$$

$$x = \frac{t - t_0}{t_1 - t_0}, \quad \tilde{x} = \frac{t - t_2}{t_1 - t_2},$$

$$\tilde{k} = 209, \quad \Delta k = 41, \quad t_0 = 0, \quad t_1 = \tilde{T} = 0,5, \quad t_2 = T = 1.$$

Здесь a – высота волновода; n – номер моды; $\chi(t)$ – функция Хевисайда; T – длительность импульса, \tilde{k} – центральная частота, параметр Δk определя-

ет ширину полосы $(\tilde{k} - \Delta k, \tilde{k} + \Delta k)$, которую занимает сигнал. Его временной профиль и амплитудный спектр представлены на рис. 2. Рабочая полоса частот (т. е. частотный диапазон, в котором нас интересуют характеристики резонансной системы) лежит между 8,5 и 11,5 ГГц. В этом интервале частот амплитудный спектр первичной волны примерно постоянен. Такой выбор возбуждающего импульса упрощает вычислительный эксперимент и визуализацию получаемых результатов.

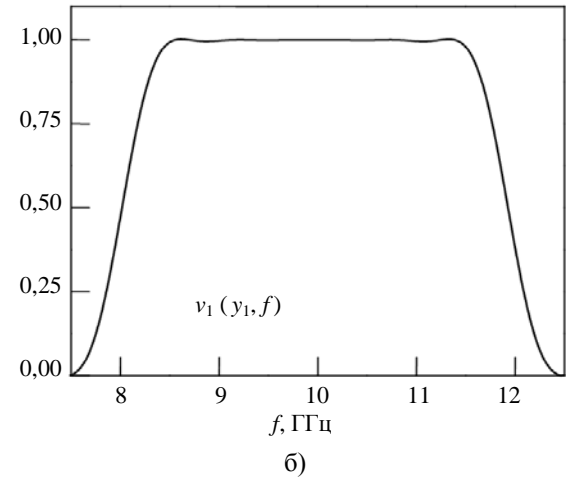
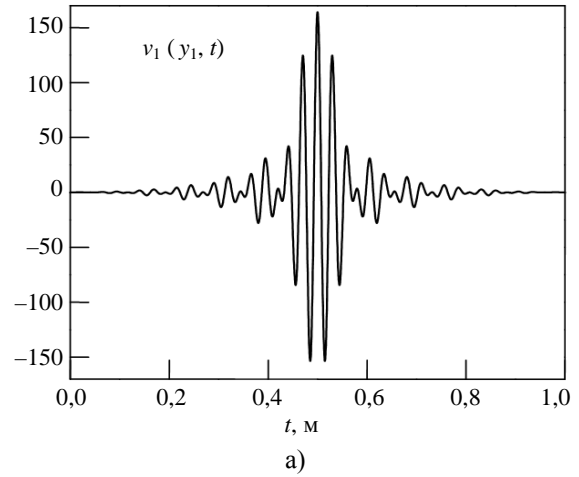


Рис. 2. Форма сигнала (а) и его амплитудный спектр (б)

3. Результаты вычислительного эксперимента. Для сравнения спектральных характеристик резонатора с различными возмущающими элементами в компьютерном моделировании возбуждения вынужденных колебаний в полудисковом резонаторе использовались три варианта модели:

– резонатор без нанесения дифракционной решетки на боковую поверхность (широко известное использование диэлектрических резонаторов [1, 2]);

– модель резонатора со сплошным проводящим экраном на боковой образующей поверхности;

– резонатор с дифракционной ленточной решеткой на боковой цилиндрической поверхности.

В последнем случае коэффициент заполнения решетки

$$\theta = \frac{d}{p} \quad (4)$$

менялся в широких пределах. Здесь d – ширина ленты решетки и p – период решетки. Период решетки подбирается таким образом, чтобы целое число периодов укладывалось на боковой поверхности резонатора:

$$M = \pi R = np, \quad (5)$$

где R – радиус диска; M – длина боковой поверхности. Для оптимального сравнения результатов компьютерного моделирования и эксперимента моделирование проведено в 3-см диапазоне в интервале перестройки панорамного измерителя КСВН и ослабления, а период p выбирался из расчета, что резонансный отклик будет находиться вблизи середины интервала перестройки измерителя. На рис. 3 показан спектр вынужденных колебаний в интервале частот 8...12 ГГц.

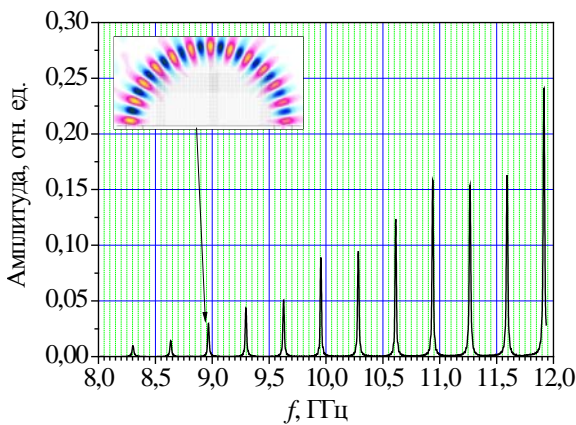


Рис. 3. Спектр вынужденных колебаний резонатора без дифракционной решетки

Наблюдается типичный для этого случая спектр E -поляризованных ($\vec{E} = E(x)$) колебаний «шепчущей галереи». На этом же рисунке представлена топология поля при азимутальном числе $n = 25$, возбуждаемого на частоте 9,0 ГГц. Этот пример является тестовым и подтверждает правильность выбора модели и метода моделирования. Амплитуда откликов возрастает по мере повышения частоты, это объясняется тем, что диаметр отверстия связи остается неизменным, а коэффициент связи возрастает.

На следующем этапе компьютерного моделирования рассмотрено возбуждение вынуж-

денных колебаний в диэлектрическом резонаторе, боковая цилиндрическая поверхность которого покрыта проводящим экраном. Геометрические размеры модели остаются прежними. На рис. 4 представлен спектр вынужденных колебаний «шепчущей галереи» и топология поля колебания, возбуждаемого вблизи 9,0 ГГц ($E_{1,2,1}$ -мода).

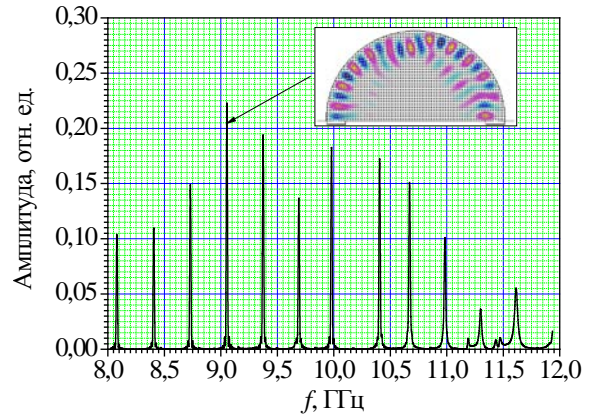


Рис. 4. Спектр и топология поля вынужденных колебаний резонатора с экраном

Из рисунка видно, что спектр вынужденных колебаний этом случае сдвигается в высокочастотную область. Это вызвано смещением максимума поля к центру резонатора и, как следствие, уменьшением оптической длины резонатора, поскольку поле за пределами резонатора отсутствует $\vec{E} = \vec{H} = 0$. Кроме того, в экранированном резонаторе возбуждаются слабовыраженные по амплитуде высшие моды, отстоящие друг от друга на малом частотном интервале. Можно предположить, что в экранированном резонаторе возбуждаются гибридные колебания. Процесс возбуждения высших и гибридных колебаний не анализируется в данной работе и требует дополнительных исследований.

Рассмотрим случай размещения прозрачной ленточной решетки на боковой поверхности двумерной модели дискового диэлектрического резонатора (см. рис. 1 и 5). Трактовка закономерностей формирования резонансных откликов системы резонатор – дифракционная решетка с учетом вклада одного и второго элементов структуры достаточно сложна. На наш взгляд, в возбуждении колебаний в системе участвуют два процесса:

– полное внутреннее отражение электромагнитной волны на криволинейной границе раздела более плотной среды (диэлектрика, из которого изготовлен резонатор) и окружающей среды (обычно воздух);

– распространение поверхностной (E -поляризованной) волны вдоль решетки с криволинейной образующей поверхностью (или дифракцию

волны на решетке при угле падения $\varphi = 90^\circ$, угол падения отсчитывается от нормали к решетке).

Дифракция E -поляризованной плоской волны единичной амплитуды на решетке, лежащей в плоскости (yOz) , описывается в виде следующего разложения [8]:

$$E_x(y, z) = e^{\frac{i2\pi}{p}X(y \sin \varphi - (z-z_1) \cos \varphi)} + \sum_{q=-\infty}^{\infty} a_q \{A_q\} e^{\frac{i2\pi}{p}X[\varphi_n y + F_n(z-z_1)]}, \quad \text{при } z \gg z_1, \quad (6)$$

где $X = p/\lambda$; p – период решетки; λ – длина волны; z_1 – координата верхней границы решетки (определяет толщину решетки); $\varphi_q = n + X \sin \varphi$;

$F_q = (X^2 - \varphi^2)^{1/2}$; $I_m(F_q) \geq 0$ и $R_e F_q \geq 0$. Для E -поляризации $E_y = E_z = 0$, $H_x = 0$, $H_y = \frac{1}{j\omega\mu} \frac{dE}{dY}$.

В рассматриваемом случае падающая плоская волна распространяется вдоль решетки, $\varphi = 90^\circ$, ленты решетки бесконечно тонкие, $z_1 = 0$, $\sin \varphi = 1$ и $\cos \varphi = 0$. С учетом условий задачи перепишем выражение (6) в следующем виде:

$$E_x(y, z) = e^{\frac{i2\pi}{p}Xy} + \sum_{q=-\infty}^{\infty} a_q \{A_q\} e^{\frac{i2\pi}{p} \varphi_q y}. \quad (7)$$

Если $I_m F_q = R_e F_q = 0$, то гармоники с номерами n распространяются вдоль поверхности решетки (вдоль оси Oy), при этом $X_q = q = 1, 2, 3, \dots$, т. е. в точках, где период кратен целому числу полувольт (в точках скольжения, см. рис. 3 работы [8]). Такие гармоники участвуют в возбуждении колебаний «шепчущей галереи». Все остальные волны излучаются в окружающее пространство.

Проведенная выше оценка дифракции волн на плоской ленточной решетке позволяет понять природу селективных свойств диэлектрического резонатора. Однако какие-либо количественные оценки (добротность, степень подавления соседних типов и т. д.) остаются неисследованными, поскольку в данном конкретном случае решетки имеют цилиндрическую (а не плоскую) форму, а процесс возбуждения колебаний сопровождается полным внутренним отражением волны, идущей вдоль решетки (точки скольжения на частотной оси [8]).

Моделирование методом $FTDT$ возбуждения колебаний в диэлектрическом резонаторе при различных значениях коэффициента заполнения решетки $\theta = d/p$ позволило оптимизировать условия одночастотного возбуждения резонатора. Для сравнения результатов период ре-

шетки выбран таким образом, чтобы селекция типов колебаний была осуществлена на частоте около 9 ГГц. Полное внутреннее отражение на границе раздела диэлектрик – воздух испытывает волна $\lambda \approx p$. При этом наблюдается незначительный сдвиг резонансной частоты f_p в сторону ее увеличения. Ниже приведены частоты $E_{12,1}$ -типа колебаний для трех случаев:

- без решетки – $f_p = 8,96$ ГГц;
- с экраном – $f_p = 9,06$ ГГц $\Delta f_1 = +0,1$ ГГц;
- с дифракционной решеткой – $f_p = 8,97$ ГГц

$\Delta f_2 = +0,01$ ГГц.

Как видно из сравнения, сдвиг резонансной частоты в резонаторе с решеткой минимален, т. е. электрическая длина резонатора меняется мало.

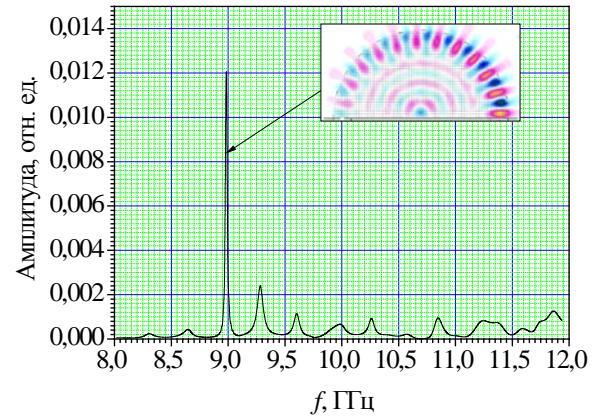


Рис. 5. Спектр и топология поля вынужденных колебаний резонатора с решеткой

Сравнение спектров вынужденных колебаний, приведенных на рис. 3–5, указывает на то, что наложение решетки на боковую поверхность резонатора приводит к разрежению спектра вынужденных колебаний дискового резонатора. При коэффициенте заполнения решетки $\theta \approx 0,3$ подавление соседних типов колебаний составляет не менее 15...20 дБ. Как показали результаты моделирования, при малых значениях $\theta \leq 0,2$ решетка вносит незначительное возмущение для колебаний, у которых $X \neq 1$, а при увеличении коэффициента заполнения проявляются экранирующие свойства и спектр принимает вид, подобный приведенному на рис. 4. Следует также обратить внимание на тот факт, что металлические элементы на боковой поверхности в виде экрана деформируют структуру поля и приводят к вариации поля вдоль радиуса (изменение радиального числа $m \neq 1$ приводит к возникновению слабовыраженных высших радиальных типов, что видно из спектра, приведенного на рис. 4).

Анализ топологии поля колебания, выделенного дифракционной решеткой (рис. 5), указывает на интерференцию поля внутри резонатора, вызванную дифракцией поля на решетке и осевой симметрией резонатора. Кроме того, на визуализированной картине на внешней части резонатора видна структура уходящего поля. Можно высказать предположение, что эти факторы приведут к снижению добротности колебания $E_{25,1}$, выделенного решеткой.

3. Экспериментальные исследования.

Экспериментальное исследование спектральных характеристик квазиоптического диэлектрического резонатора проведено в 3-см диапазоне длин волн с помощью стандартного измерителя КСВН и ослабления типа Р2-61 в диапазоне частот 8,2...12,5 ГГц. Функциональная схема измерительной установки, работающей по схеме «на отражение», показана на рис. 6. Резонатор изготовлен из фторопласта ($\varepsilon = 2,06$, диаметр резонатора 214 мм, высота 20 мм) и устанавливался в юстировочном механизме, позволяющем плавно изменять взаимное расположение исследуемого резонатора и открытого конца возбуждающего волновода сечением $23 \times 0,9$ мм. Резонатор возбуждался через щель связи в нижнем (плоском) зеркале. На образующую диска наносилась дифракционная ленточная решетка на диэлектрической подложке либо сплошной проводящий экран. Предусматривалась возможность перемещать дифракционную решетку относительно торцевого зеркала и изменять поляризацию возбуждаемых колебаний.

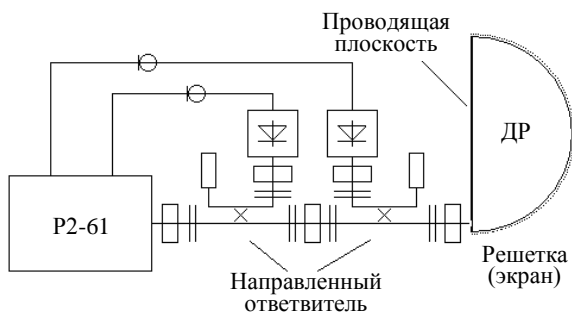


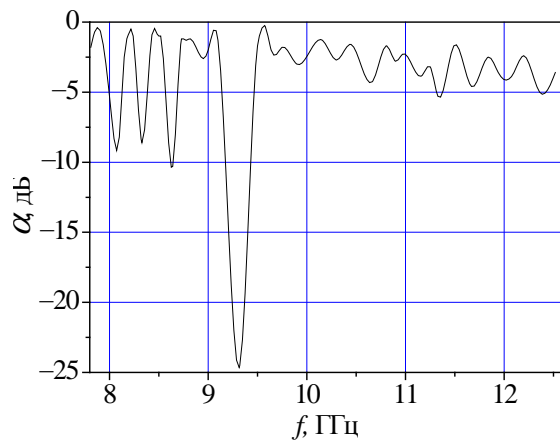
Рис. 6. Функциональная схема измерительной установки

Перемещением диэлектрической подложки с нанесенной на нее ленточной дифракционной решеткой первая лента решетки смещалась относительно отражающей плоскости (плоского зеркала). Поляризация менялась поворотом диэлектрического резонатора на проводящей плоскости на 90° относительно щели связи. В данной работе приведены результаты экспериментального исследования E -поляризованных вынужденных колебаний. С целью упрощения сравнения с результатами компьютерного моделирования

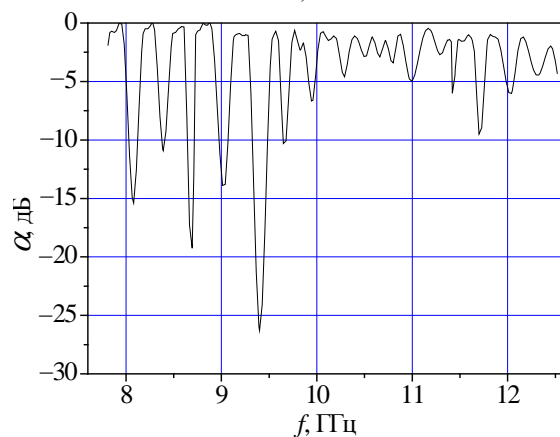
диапазоны частот эксперимента и моделирования совпадали.

В процессе проведения эксперимента на боковую поверхность полудиска накладывались тонкие тефлоновые ленты с экраном (сплошная металлизация ленты) либо ленточными решетками с различным коэффициентом заполнения θ . Период решеток при этом не изменялся и составлял $p = 15,3$ мм, что удовлетворяло условию целого числа периодов на боковой поверхности резонатора (5).

На рис. 7 представлены наиболее характерные спектры вынужденных колебаний, снятые по схеме «на отражение» для решеток с коэффициентом заполнения $\theta = 0,3$ (а) и $\theta = 0,5$ (б). При повторных экспериментах наблюдалась хорошая повторяемость результатов.



а)



б)

Рис. 7. Спектры вынужденных колебаний резонатора с решеткой при $\theta = 0,3$ (а) и $\theta = 0,5$ (б)

Как видно из рисунка, при $\theta = 0,3$ и частоте ниже 9 ГГц ($X < 1$) подавление колебаний составляло не меньше 15 дБ, а при $X > 1$ подавление составляло около 23 дБ. Другие дифракционные решетки с коэффициентом заполнения θ ,

отличным от 0,3, оказывают меньшее влияние на спектр вынужденных колебаний дискового резонатора. Например, при $\theta = 0,5$ и более проявляется экранирующее свойство решетки (рис. 7, б), при этом резонансный отклик при $X = 1$ сдвигается в высокочастотную область, как и было показано в компьютерном эксперименте (см. рис. 4). Это свидетельствует об уменьшении электрической длины резонатора и перемещении максимума поля к центру резонатора.

Поскольку дифракционная решетка, расположенная на боковую поверхность, является периодической неоднородностью на резонаторе, то следует ожидать снижения добротности выбранного типа колебаний.

Выводы. С помощью компьютерного моделирования исследованы электродинамические процессы в диэлектрическом дисковом резонаторе с дифракционной ленточной решеткой. Показано, что метод *FDTD* является адекватным для изучения возбуждения вынужденных колебаний в системе, где колебательные процессы обусловлены дифракцией и формированием стоячих волн.

Показано, что геометрические размеры дискового резонатора и решетки (радиус диска, шаг решетки) необходимо выбирать таким образом, чтобы сингулярные точки на дисперсионных характеристиках обоих объектов совпали в точке на частотной оси, в которой необходимо выделить заданную частоту.

Селективные свойства исследуемого резонатора зависят от коэффициента заполнения решетки. Установлено, что максимальное подавление соседних типов колебаний наблюдается при коэффициенте заполнения $\theta = 0,3$.

Благодаря использованию дифракционной решетки в дисковом диэлектрическом резонаторе достигнуто практически одночастотное возбуждение колебаний типа «шепчущая галерея» в широком интервале частот. Диэлектрический резонатор с дифракционной решеткой является перспективным устройством для стабилизации частоты твердотельных источников миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Микрорезонаторы с дифракционной решеткой перспективны для улучшения спектра излучения полупроводниковых лазеров.

Библиографический список

1. *Диэлектрические резонаторы* / под ред. М. Е. Ильченко. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.
2. *Квазиоптические твердотельные резонаторы* / А. Я. Кириченко, Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов, Н. Т. Черпак. – К.: Наук. думка, 2008. – 296 с.
3. *High-Q wet-etched GaAs micro disks containing InAs quantum lasers* / B. Gayral, J. M. Gérard, A. Lemaître et al. // *Appl. Phys. Lett.* – 1999. – 75, N 13. – P. 1908–1910.

4. *Use of whispering-gallery modes for complex permittivity determinations of ultra-low-loss dielectric materials* / K. Derzakowich, A. Abramowich, M. E. Tobar, R. G. Geer // *Proc. IEEE on MTT.* – 1999. – 47, N 6. – P. 752–759.
5. *Никольский В. В.* Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М.: Наука, 1989. – 544 с.
6. А. с. 1048964 СССР. Сверхвысокочастотный резонатор / В. Ф. Взятыхшев, В. С. Добромыслов, Г. П. Раевский и др. – Бюл. № 15. – 1988. – С. 215.
7. *Гананольский Е. М.* Случайные неоднородности в микрорезонаторе: теория и моделирование на миллиметровых волнах / Е. М. Гананольский, З. Е. Еременко, Ю. В. Тарасов // 18-я Междунар. конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – Севастополь, 2008. – С. 155–156.
8. *Резонансное рассеяние волн: в 2 т. Т. 1.* Дифракционные решетки / В. П. Шестопалов, А. А. Кириленко, С. А. Масалов, Ю. К. Сиренко. – К.: Наук. думка, 1986. – 232 с.
9. *Пат. України № 90831.* Мікрохвильовий резонатор / О. І. Білоус, О. М. Сухоручко, А. І. Фісун. – Бюл. № 10. – 2010.
10. *Sirenko Y. K.* Modeling and analysis of transient processes in open resonant structures. New methods and techniques / Y. K. Sirenko, S. Strom, N. P. Yashina. – N. Y.: Springer, 2007. – 362 p.
11. *Engquist B. B.* Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves / B. B. Engquist, A. Majda // *Mathematics of Computation.* – 1977. – 31, N 139. – P. 629–651.
12. *Mur G.* Absorbing boundary conditions for the finite difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations / G. Mur // *IEEE Tr. on EMC.* – 1981. – 23, N 4. – P. 377–382.
13. *Сиренко К. Ю.* Точные «поглощающие» условия в начально-краевых задачах теории открытых волноводных резонаторов / К. Ю. Сиренко, Ю. К. Сиренко // *Журн. вычислит. математики и мат. физики.* – 2005. – 45, № 3. – С. 509–525.
14. *Velychko L. G.* Time-domain analysis of open resonators. Analytical grounds / L. G. Velychko, Y. K. Sirenko, O. S. Velychko // *Progress in Electromagnetics Research.* – 2006. – 61. – P. 1–26.
15. *Пазынин В. Л.* Преобразование поверхностных волн в объемные в системе «частично экранированный планарный волновод – открытый диэлектрический резонатор» / В. Л. Пазынин, В. Е. Филиппенко // *Электромагнитные волны и электронные системы.* – 2008. – 13, № 10. – С. 21–29.

Рукопись поступила 19.06.2012 г.

О. И. Belous, V. L. Pazynin,
О. N. Sukhoruchko, A. I. Fisun

AZIMUTAL MODES IN QUASI-OPTICAL DIELECTRIC RESONATOR WITH DIFFRACTION GRATING

Quasi-optical dielectric resonators are widely used in microwave engineering as the components of source control systems and as well as in the facilities for study of electro-physical properties of substance. The high Q-quality and convenience in service are main positive properties of these resonators. But the frequency intervals between azimuth modes is notably small. The latter circumstance gives a high probability of the frequency jumping. The aim of our investigation is to study theoretically and experimentally a possibility of the spectrum rarefaction of the forced azimuth «whispering gallery» modes of a disk dielectric resonator. There are three resonator types investigated: dielectric resonator without any additional components, dielectric resonator with conducted screen on the cylindrical surface and dielectric resonator with diffraction grating consisting of the conducting

strips situated on the lateral cylindrical surface. Computer-aided simulation was carried out by the finite-difference in time-domain (FDTD) method. Experimental study was performed by the standard VSWR-measurer at 8...12 GHz frequency band. By means of computer and full-size experiments there were received the spectra of «whispering gallery» modes of semi disk resonator, resonator covered by screen, and resonator with diffraction grating. The azimuth mode excitation at one frequency with damping of adjacent modes no less than 15...20 dB at the filling coefficient of diffraction grating being equal to $\theta = 0.3$ has been derived. FDTD-technique is an adequate grid method for simulation of the forced oscillations in the systems where oscillatory processes are due to both diffraction and the forming of standing waves. Single mode excitation had been accomplished owing to using a diffraction grating in disk resonator.

Key words: dielectric resonator, mode selection, mode suppressing.

О. І. Білоус, В. Л. Пазинін,
О. М. Сухоручко, А. І. Фісун

АЗИМУТАЛЬНІ КОЛИВАННЯ У КВАЗІОПТИЧНОМУ ДІЕЛЕКТРИЧНОМУ РЕЗОНАТОРІ З ДИФРАКЦІЙНОЮ ГРАТКОЮ

Квазиоптичні діелектричні резонатори широко використовуються в сучасній мікрохвильовій техніці в якості елементів стабілізації джерел випромінювання, а також у пристроях для дослідження електрофізичних властивостей середовищ. Вони мають високу добротність, зручні в експлу-

тації, проте в режимі збудження коливань типу «шепучої галереї» частотний інтервал між сусідніми азимутальними коливаннями невеликий, що не виключає довольного перескоку частоти робочого типу коливань на сусідні. Метою нашого дослідження є теоретичне і експериментальне дослідження можливості розрідження спектру вимушених азимутальних коливань «шепучої галереї» дискового діелектричного резонатора. Досліджувалися три типи полудискових резонаторів – діелектричний резонатор без яких-небудь додаткових пристроїв, діелектричний резонатор з провідним екраном на циліндричній поверхні і діелектричний резонатор з дифракційною ґраткою з провідних стрічок на бічній циліндричній поверхні резонатора. Комп'ютерне моделювання проведено за допомогою методу кінцевих різниць у часовій області (FDTD). Експериментальне дослідження проведено з використанням стандартного вимірювача КСХН в діапазоні частот 8...12 ГГц. Шляхом комп'ютерного і натурального експериментів отримано спектри коливань типу «шепучої галереї» полудискового резонатора, резонатора з екраном і резонатора з стрічковою дифракційною ґраткою на бічній поверхні. При коефіцієнті заповнення ґратки $\theta = 0,3$ отримано збудження азимутального типу на одній частоті з подавленням сусідніх типів не менш ніж на 15...20 дБ. Метод FDTD є адекватним сітковим методом у моделюванні процесів збудження вимушених коливань в системах, де коливальні процеси обумовлені дифракцією і формуванням стоячих хвиль. Завдяки використанню дифракційної ґратки в дисковому діелектричному резонаторі досягнуто практично одночастотне збудження коливань типу «шепучої галереї» у широкому інтервалі частот.

Ключові слова: діелектричний резонатор, селекція типів коливань, пригнічення типів коливань.