

ПРИКЛАДНА РАДІОФІЗИКА

УДК 537.86:621.372.413

Р. И. Белоус, С. П. Мартынюк, А. П. Моторненко, И. Г. Скуратовский

ВОЛНОВОДНО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: raisa@ire.kharkov.ua*

Исследованы особенности волноводно-диэлектрического резонатора (ВДР) в миллиметровом диапазоне длин волн. Приведены расчетные зависимости собственных частот и добротностей H_{111} -колебания в ВДР на круглом волноводе от параметров резонатора. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными, полученными на макете резонатора. Ил. 3. Библиогр.: 4 назв.

Ключевые слова: волноводно-диэлектрический резонатор, собственные частоты и добротности, миллиметровый диапазон волн.

В настоящее время волноводно-диэлектрические резонаторы (ВДР) занимают достойное место в классе резонансных структур СВЧ-диапазона, о чем свидетельствуют широко представленные публикации на эту тему в научных журналах, а также написанные обзоры и монографии, например [1, 2]. В случае ВДР на отрезке запердельного волновода реализуются условия нарушения режима запердельности на участке с диэлектрическим элементом, что позволяет построить резонансную структуру с новыми, важными для практики особенностями. Применение такого типа резонаторов в технике СВЧ позволяет расширить функциональные возможности устройства и снизить массово-габаритные показатели.

В последних наших работах на тему ВДР [3, 4] изложены результаты теоретического и экспериментального исследований резонатора на круглом запердельном волноводе, частично заполненном диэлектриком. В этих статьях изложена методика расчета собственных частот и добротностей несимметричных колебаний магнитного типа в ВДР с короткозамыкающим (КЗ) поршнем. Для иллюстрации возможностей метода выполнены численные расчеты характеристик резонатора, а также проведены экспериментальные исследования макета ВДР в 3-см диапазоне [4].

Настоящая работа посвящена изучению особенностей низшего несимметричного резонансного колебания магнитного типа в ВДР на круглом запердельном волноводе в миллиметровом (мм) диапазоне. Целью работы является изучение закономерностей изменения электрических параметров основного колебания H_{111} в ВДР от размеров резонатора, выяснение возможностей его частотной перестройки, в том числе – плавной перестройки частоты с помощью КЗ-поршня.

1. Методика расчета и техника эксперимента. Схематическое изображение ВДР при-

ведено на вставке рис. 1. Исследуемый резонатор представляет отрезок круглого волновода внутренним диаметром $2a$, частично заполненный диэлектрическим элементом (ДЭ) в виде цилиндра диаметром $2a$ длиной l . На расстоянии L от одного из торцов ДЭ в волноводе размещен перестраивающий КЗ-поршень. Как видно, в представленном варианте ВДР имеет плоские границы раздела диэлектрик-воздух, что позволяет возбуждать в резонаторе практически чистую волну H_{111} без волн высших типов, чему способствует также наличие отрезков запердельных волноводов.

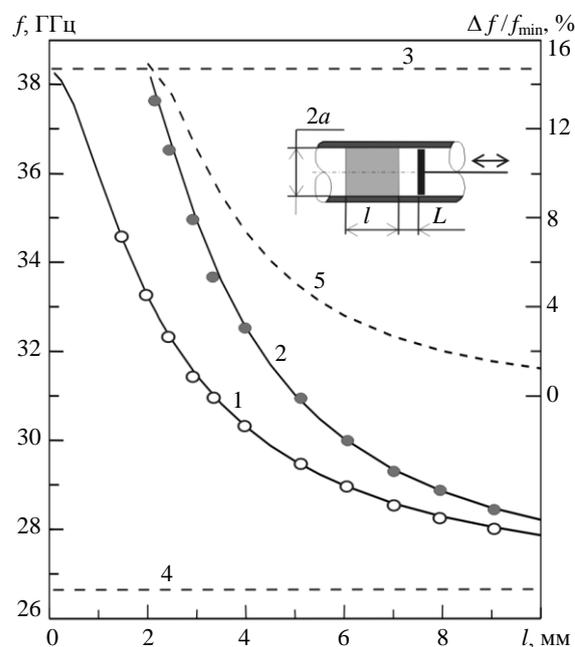


Рис. 1. Зависимости собственных частот H_{111} -колебания и перестройка частоты ВДР от длины ДЭ

Методика расчета собственных частот и добротностей H_{111} -колебания в ВДР изложена в

работе [3]. Резонансные частоты рассчитывались по уравнениям для спектра собственных частот колебаний $H_{mn\delta}$ в ВДР с КЗ-поршнем, которые были получены методом частичных областей. В расчетах волновод предполагался бесконечно проводящим, а диэлектрик – идеальным. Собственная добротность резонансного колебания рассчитывалась с привлечением понятия частичных добротностей. При этом учитывались потери как в диэлектрике, так и в стенках металлического волновода на участке распространяющейся волны (волновод с диэлектриком), а также в запредельных отрезках волновода. В численных расчетах внутренний диаметр круглого волновода принимался равным $2a = 4,59$ мм, проводимость стенок волновода $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ См/м, а относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь ДЭ были выбраны $\varepsilon = 2,05$ и $\text{tg}\delta = 1,9 \cdot 10^{-4}$ соответственно.

Экспериментальный макет ВДР содержал отрезок волновода указанного диаметра с КЗ-поршнем, выполненными из бескислородной меди. В качестве диэлектрика был выбран тефлон. В волновод поочередно помещался один ДЭ из набора ДЭ диаметром 4,59 мм разной длины (≤ 10 мм). Возбуждение резонансных колебаний в ВДР производилось с использованием панорамного измерителя типа Р2-65, а резонансная частота измерялась с помощью волномера. Собственная добротность колебания определялась по общепринятой методике в режиме связи резонатора с нагрузкой ниже критической.

Неточность изготовления волновода по диаметру составляла $\pm 0,01$ мм. Диаметр ДЭ был выполнен таким, чтобы ДЭ мог перемещаться в волноводе с небольшим усилием; его длина была выполнена с точностью $\pm 0,02$ мм. Диаметр КЗ-поршня был на $0,01 \div 0,02$ мм меньше диаметра волновода. Ошибка измерений резонансной частоты f составляла $50 \div 100$ МГц. Для повышения точности определения добротности исследуемого резонатора была улучшена стабильность источников питания панорамного измерителя, а также учитывалась ширина спектра колебания несущей частоты.

2. Результаты расчетов и экспериментального исследования. На рис. 1 приведены расчетные зависимости резонансной частоты H_{111} -колебания в исследуемом ВДР от длины ДЭ для условий $L = \infty$ (здесь и далее численно $L = 150$ мм) и $L = 0$ (кривые 1 и 2). Прямые 3 и 4 соответствуют значениям критических частот волны H_{111} в пустом волноводе и заполненном диэлектриком с $\varepsilon = 2,05$ (38,33 и 26,66 ГГц).

Светлыми кружками представлены значения резонансных частот f_∞ , полученные экспериментально для разных длин ДЭ при удалении

КЗ-поршня ($L = \infty$), а темными – значения f_0 при условии касания КЗ-поршня ДЭ ($L = 0$). Видно, что имеет место достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений f_∞ и f_0 . Отличия расчетных значений f_∞ от экспериментальных не превышают десятков, а f_0 – десятков или нескольких сотен мегагерц, причем большие расхождения соответствуют меньшим длинам ДЭ. Различия между результатами расчетов и экспериментально измеренными значениями частот обусловлены возможным несовпадением с реальной расчетной величиной диэлектрической проницаемости тефлона, а также неточностью изготовления резонатора и ошибками измерений.

Зависимость 5 на рис. 1 отражает возможную плавную перестройку частоты резонатора по отношению к нижней резонансной частоте при перемещении КЗ-поршня от $L = \infty$ к границе с ДЭ. Видно, что в рассматриваемых условиях величина перестройки находится в пределах $1 \div 14$ %.

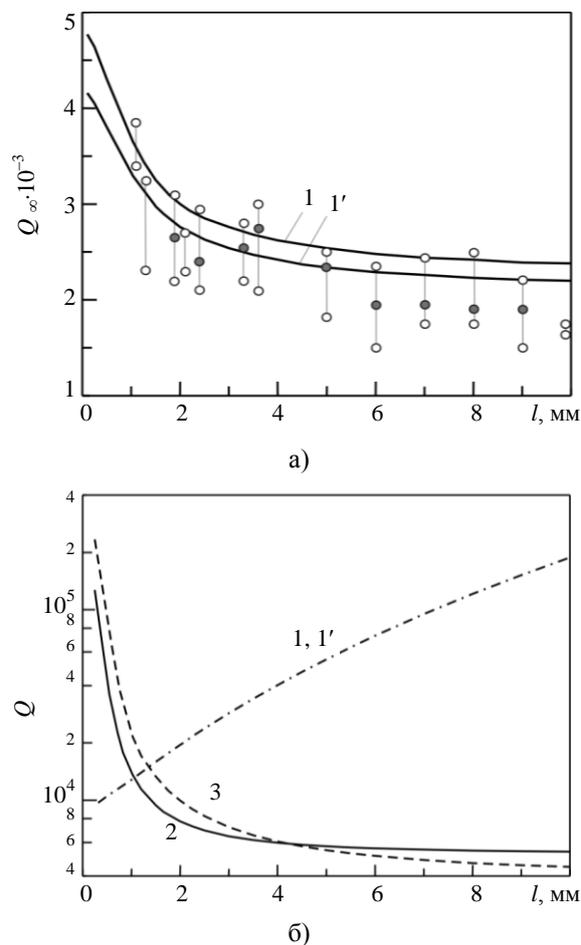


Рис. 2. Расчетные зависимости собственной добротности (а) и частичных добротностей (б) ВДР от длины ДЭ в отсутствие КЗ-поршня; значки \circ и \bullet – экспериментальные значения Q

На рис. 2, а кривой 1 представлена расчетная зависимость собственной добротности Q_∞

колебания H_{111} от длины ДЭ, полученная для условий $\varepsilon = 2,05$; $\text{tg}\delta = 1,9 \cdot 10^{-4}$ и $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ См/м при $L = \infty$, а кривой 1' – для значений $\varepsilon = 2,05$; $\text{tg}\delta = 1,9 \cdot 10^{-4}$; $\sigma = 4,4 \cdot 10^7$ См/м.

На рис. 2, б приведены зависимости частичных добротностей от длины ДЭ: кривая 1 (совпадающая с кривой 1') – частичная добротность $Q_{1,3}$ запердельных участков волновода, 2 – частичная добротность Q_d ДЭ, а 3 – частичная добротность Q_2 , обусловленная потерями СВЧ-энергии в металле на участке волновода с ДЭ.

Кружками на рис. 2, а отмечены измеренные экспериментальные значения собственных добротностей резонатора для разных величин l при $L = \infty$. Для каждой выбранной длины ДЭ l приведены данные добротности, полученные многократными измерениями, причем показан разброс измеренных величин, а также указаны наиболее часто встречающиеся значения добротности (в этом случае отмеченные темными кружками). Обращает на себя внимание увеличение величины добротности колебания с ростом частоты (с уменьшением l ДЭ) (кривая 1 на рис. 2, а), характерное для резонаторов типа ВДР. Из рис. 2, б видно, что при величинах $l > 4$ мм собственная добротность Q_∞ обусловлена в основном потерями в стенках участка волновода с ДЭ (кривая 3) и несколько в меньшей степени – потерями в диэлектрике (кривая 2), а при малых величинах l на величине Q_∞ сказываются также потери в запердельных участках волновода (кривая 1), причем их влияние тем больше, чем меньше l . Это объясняется тем, что с уменьшением величины l повышается резонансная частота и электромагнитная энергия перераспределяется из объема диэлектрика в участки запердельных волноводов, что и приводит к росту потерь в них.

Как видно из рис. 2, а, измеренные значения Q_∞ лучше согласуются с расчетными при малых величинах l и хуже – при больших l . Отметим, что в расчетах кривой добротности 1 на рис. 2, б значение проводимости меди σ взято из справочника, а для кривой 1' ее величина выбрана несколько меньшей, что ближе к экспериментальным условиям. Тем не менее из рис. 2, а видно, что изменениями электрических параметров материала волновода и диэлектрика не объясняются отличия результатов расчета и эксперимента. Расхождение расчетных и экспериментальных данных может быть обусловлено неточным выбором для расчетов тангенса угла потерь диэлектрика и возможно связано с частотной дисперсией потерь выбранного диэлектрика в данном частотном диапазоне, а также с погрешностями эксперимента.

На рис. 3 приведены аналогичные зависимости расчетных кривых собственных (рис. 3, а) и

частичных (рис. 3, б) добротностей колебания H_{111} от длины ДЭ l при $L = 0$. Обозначения кривых на этом рисунке соответствуют обозначениям на рис. 2. Кривые 1 и 1' на рис. 3, б характеризуют частичные добротности запердельных участков волновода, без КЗ-поршня и с КЗ-поршнем соответственно. Сопоставление кривых 1 на рис. 2, а и 3, а показывает, что в широкой области больших значений l зависимости Q_∞ и Q_0 практически совпадают, хотя согласно расчетам Q_0 несколько выше, чем Q_∞ во всем интервале изменения величины l . С уменьшением величины l добротность Q_0 тем больше величины Q_∞ , чем меньше l .

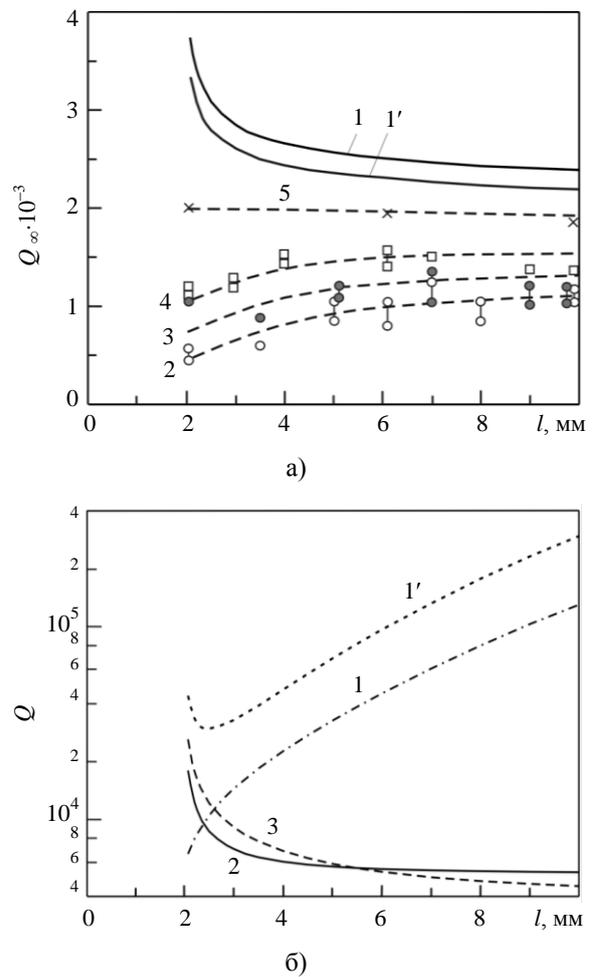


Рис. 3. Расчетные зависимости собственной добротности (а) и частичных добротностей (б) ВДР от длины ДЭ, экспериментальные зависимости добротности ВДР при различных положениях КЗ-поршня

Как видно из рисунков, поведение кривых частичных добротностей, приведенных на рис. 3, б, аналогично соответствующим кривым на рис. 2, б.

Надежно экспериментально измерить величины собственных добротностей Q_0 оказалось

трудной задачей из-за наличия зазора между КЗ-поршнем и волноводом, как оказалось, особенно влияющего на величину добротности в мм диапазоне.

На рис. 3, а кривой 2 представлена зависимость измеренной добротности от длины ДЭ при расстоянии от ДЭ до КЗ-поршня $L = 0,14$ мм, кривой 3 – при $L = 0,47$ мм, кривой 4 – при $L = 2$ мм. Как видно, кривые 2–4 отличаются от расчетной кривой 1 как количественно, так и качественно. Чтобы выяснить степень влияния зазора между КЗ-поршнем и волноводом в исследуемом ВДР на величину измеренной добротности, был проведен специальный эксперимент. Он проводился следующим образом. Вместо КЗ-поршня необходимая величина L была обеспечена путем перемещения ДЭ от одного из торцов волновода на необходимое расстояние, причем этот торец плотно прикрывался диском большего диаметра волновода, притертым к торцу волновода (внешний диаметр волновода составлял в этом случае 10 мм, а диска – 14 мм). Длина же волновода ВДР была выбрана таким образом, чтобы при соединении его с узлом возбуждения и волноводом панорамного измерителя обеспечивались условия связи резонатора с нагрузкой ниже критической, что необходимо для измерения добротности резонатора. Как оказалось, в такой конструкции резонатора удается измерить Q_0 даже при величине $L = 0$. (В этом случае ДЭ располагался непосредственно за торцом волновода и касался закорачивающего диска). На рис. 3, а эти измерения представлены кривой 5. Как видно, в этих условиях полученная экспериментальная кривая ближе к расчетной (кривая 1) и может быть использована для оценки реальных значений Q_0 в мм диапазоне.

Выводы. Проведенные исследования особенностей ВДР показали, что также как и в см в мм диапазоне можно построить резонаторы типа ВДР, пригодные к практическому их использованию. Такие резонаторы имеют все основные преимущества, присущие ВДР см диапазона. В исследуемом ВДР можно обеспечить плавную перестройку частоты на $1 \div 14$ %, и при этом сохраняется добротность резонатора в пределах $1\,000 \div 2\,000$, что достаточно для использования

таких ВДР в качестве резонаторов гетеродинов. Кроме этого, ВДР можно использовать также для определения параметров диэлектриков в широком частотном диапазоне мм длин волн.

1. *Диэлектрические резонаторы* / под ред. М. Е. Ильченко. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.
2. *Капилевич Б. Ю.* Волноводно-диэлектрические структуры / Б. Ю. Капилевич, Е. Р. Трубехин. – М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.
3. *Расчет и экспериментальное исследование волноводно-диэлектрического резонатора* / Р. И. Белоус, Ю. Г. Макеев, А. П. Моторненко, Л. П. Моторненко // Радиотехника: науч.-техн. сб. // Харьков. нац. ун-т радиоэлектрон. – Х., 2003. – № 131. – С. 139–144.
4. *Метод измерения параметров диэлектриков в микроволновом диапазоне* / Р. И. Белоус, Ю. Г. Макеев, А. П. Моторненко, Л. П. Моторненко // Радиотехника: науч.-техн. сб. // Харьков. нац. ун-т радиоэлектрон. – Х., 2004. – № 136. – С. 114–119.

R. I. Belous, S. P. Martynyuk,
A. P. Motornenko, I. G. Skuratovskiy

WAVEGUIDE-DIELECTRIC RESONATOR OF THE MILLIMETER WAVE BAND

The particularities of the waveguide-dielectric resonator (WDR) at the millimeter wavelength band have been investigated. The computed dependences for the eigen frequencies and Q -factors for the H_{111} -mode in the WDR on the circular waveguide as a function of resonator parameters have been presented. The computed results have been compared with the experimental data.

Key words: waveguide-dielectric resonator, eigen frequencies and Q -factors, millimeter wavelength band.

Р. І. Білоус, С. П. Мартинюк,
О. П. Моторненко, І. Г. Скуратівський

ХВИЛЕВОДНО-ДІЕЛЕКТРИЧНИЙ РЕЗОНАТОР МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

Досліджено особливості хвилеводно-діелектричного резонатора в міліметровому діапазоні хвиль. Наведено розрахункові залежності власних частот і добротностей H_{111} -коливання в такому резонаторі від його параметрів. Результати розрахунків порівняно з експериментальними даними, що одержані на макеті резонатора.

Ключові слова: хвилеводно-діелектричний резонатор, власні частоти та добротності, міліметровий діапазон хвиль.

Рукопись поступила 21.05.10 г.