

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА СВЧ

УДК 537.86:621.372.413

***T*- и *H*-КОЛЕБАНИЯ В ВОЛНОВОДНО-КОАКСИАЛЬНОМ РЕЗОНАТОРЕ**

С. П. Мартынюк, А. П. Моторненко, И. Г. Скуратовский, О. И. Хазов

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: briz@ire.kharkov.ua

Исследованы характеристики *T*- и *H*-колебаний в волноводно-коаксиальном резонаторе (ВКР). Проведены численные расчеты зависимостей собственных частот *T*- и *H*-колебаний, а также собственных добротностей *H*-колебаний от параметров резонатора. Экспериментальные исследования *T*- и *H*-колебаний выполнены на едином составном макете ВКР 3-см диапазона. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными. Ил. 2. Табл. 1. Библиогр.: 5 назв.

Ключевые слова: волноводно-диэлектрический резонатор, *T*- и *H*-колебания, собственная частота, собственная добротность.

В работе [1] была предложена новая разновидность волноводно-диэлектрического резонатора СВЧ диапазона, названная волноводно-коаксиальным резонатором (ВКР). ВКР состоит из последовательно расположенных и соединенных между собой отрезка круглого волновода, коаксиальной линии и еще одного отрезка круглого волновода. Диаметры волноводов и коаксиальной линии совпадают. В условиях резонанса круглый волновод выбранного диаметра является запредельным для резонансной частоты.

Как показали предварительные исследования, в ВКР могут возбуждаться резонансные колебания *T*-, *H*- и *E*-типов, обусловленные основной волной, а также волноводными модами коаксиальной линии. На их свойства заметное влияние оказывают запредельные участки круглого волновода.

В работах [2, 3] изложены методики расчета собственных частот и добротностей колебаний магнитного типа в ВКР. В работе [4] представлены результаты численного расчета и экспериментального исследования характеристик *H*-колебания в ВКР миллиметрового (мм) диапазона. В работе [5] приведены выражения для расчета резонансной частоты основного *T*-колебания в ВКР и исследованы некоторые его особенности.

Настоящая работа посвящена сравнительному изучению *T*- и *H*-колебаний в ВКР сантиметрового (см) диапазона. Проведены численные расчеты собственных частот *T*- и H_{111} -колебаний в ВКР в зависимости от длины коаксиальной части резонатора и внутреннего диаметра коаксиала, а также получены расчетные зависимости собственных добротностей H_{111} -колебания. Расчеты были выполнены с использованием выражений, приведенных в работах [2, 3, 5], причем в случае H_{111} -колебания для расчета резонансной частоты использовалось одноволновое прибли-

жение. Экспериментальные исследования проведены на едином общем макете резонатора, получены характеристики этих колебаний для разных параметров резонансной структуры. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными зависимостями.

В верхней части рис. 1, а приведено схематическое изображение ВКР. Конструктивно он представляет отрезок круглого волновода, в который вставлен металлодиэлектрический элемент (МДЭ). МДЭ состоит из металлического стержня, аксиально симметрично помещенного в диэлектрическую втулку внешним диаметром, равным диаметру круглого волновода. Как видно, МДЭ вместе с частью волновода образует отрезок коаксиальной линии. К нему примыкают с обеих сторон отрезки круглого волновода.

В настоящих экспериментальных исследованиях использовался макет ВКР, построенный на основе круглого волновода внутренним диаметром $2b = 13,05$ мм, длиной 70 мм. В этот волновод поочередно вставлялся один из двух наборов МДЭ. Наборы состояли из МДЭ разной длины и имели стержни двух диаметров: один набор содержал стержни диаметром $2a = 2,5$ мм, а второй – 5,9 мм. В обоих наборах длина МДЭ изменялась в пределах $0 < l \leq 18$ мм. Свободный конец одного из отрезков волновода ВКР присоединялся к измерительному тракту, а в свободный отрезок второго волновода можно помещать короткозамыкающий поршень для плавного изменения резонансной частоты выбранного колебания. Основными элементами измерительного тракта были ответвители, генератор качающей частоты, индикатор коэффициента стоячей волны по напряжению и ослаблений, а также частотомер, необходимые для измерения резонансной частоты f и добротности Q резонансного колебания.

Для возбуждения *T*-колебания использовался штырь, а *H*-колебания – петля. Штырь и петля были помещены в один из отрезков круглого запердельного волновода резонатора. Величина связи резонатора с нагрузкой регулировалась длиной участка запердельного волновода. Все измерения производились в режиме связи ниже критической.

На рис. 1, а приведены кривые зависимостей резонансных частот *T*- и *H*₁₁₁-колебаний в ВКР от длины *l* МДЭ с диаметром $2a = 2,5$ мм, а на рис. 1, б с диаметром $2a = 5,9$ мм. Расчетные пунктирные кривые 1' и 2' характеризуют соответственно *T*- и *H*₁₁₁-колебания, а сплошные кривые 1 и 2 – экспериментальные зависимости. При расчетах было взято табличное значение относительной диэлектрической проницаемости тефлона $\epsilon = 2,05$.

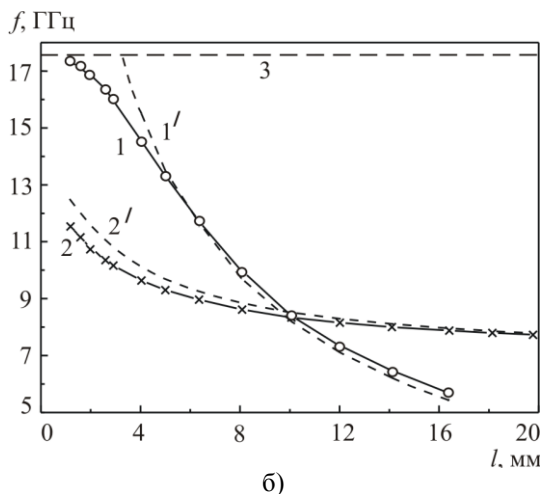
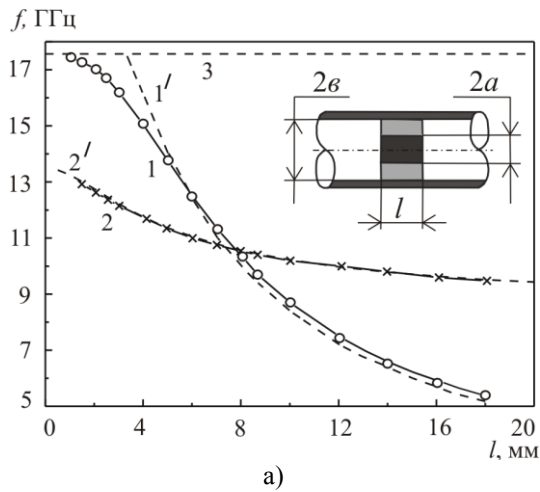


Рис. 1. Зависимости частот *T*- и *H*₁₁₁-колебаний в ВКР от длины коаксиальной части резонатора

В масштабе рис. 1, а расчетная и экспериментальная кривые 2 и 2' совпадают. Изменение частоты вариацией длины *l* МДЭ в случае

T-колебания значительно превышает изменение частоты *H*₁₁₁-колебания. По отношению к нижней частоте повышение частоты *f* *T*-колебания для МДЭ с $2a = 2,5$ мм составило ~200 %, *H*₁₁₁-колебания – 39 %, а для МДЭ с $2a = 5,9$ мм – соответственно ~200 и ~50 %. Имеет место хорошее согласие результатов расчета и эксперимента как для *T*-, так и для *H*₁₁₁-колебания. Исключение составляют малые величины *l* для величины *f* *T*-колебания и малые величины *l* для резонансной частоты *H*₁₁₁-колебания с $2a = 5,9$ мм, причем отличие тем больше, чем меньше длина *l* МДЭ. В случае *H*₁₁₁-колебания (для МДЭ $l = 5,9$ мм и более) для повышения точности расчетов частоты необходимо пользоваться не простым выражением для одноволнового приближения, а учитывать влияние высших типов колебаний. В работе [2] необходимые для этого выражения приведены, а также показано, насколько улучшаются результаты расчетов.

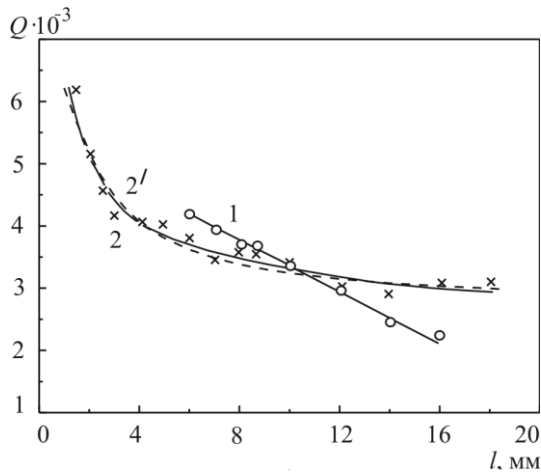
На рис. 1 приведены также пунктирные прямые 3, характеризующие величину критической частоты волны E_{01} в пустом круглом волноводе выбранного диаметра, равную 17,6 ГГц. Видно, что с уменьшением длины *l* МДЭ резонансная частота *T*-колебания стремится к критической частоте волны E_{01} .

В таблице указаны для *T*- и *H*₁₁₁-колебаний диапазоны частот, при которых оценивалось отличие экспериментальных значений резонансной частоты от расчетных для двух наборов МДЭ (с величинами $2a = 2,5$ и $5,9$ мм). Под строчками диапазонов приведены данные отличий в процентном соотношении результатов экспериментальных измерений от численных расчетов.

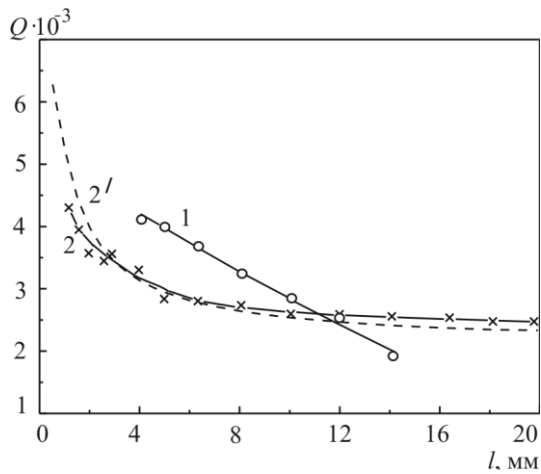
Диаметр коаксиала, мм	Тип колебания	Диапазон частот, ГГц	Тип колебания	Диапазон частот, ГГц
		Отличие эксперимента, %		Отличие эксперимента, %
2a=2,5	<i>T</i>	5,8÷14,5	<i>H</i> ₁₁₁	9,5÷13,1
		0,1÷3		0,05÷0,6
2a=5,9	<i>T</i>	5,7÷13,3	<i>H</i> ₁₁₁	7,7÷11,5
		0,3÷4		1,3÷8,5

На рис. 2 приведены кривые добротностей *T*- и *H*₁₁₁-колебаний, соответствующих зависимостям резонансных частот рис. 1. При расчетах были взяты величины тангенса угла потерь диэлектрика и проводимости меди $\text{tg}\delta = 1,7 \cdot 10^{-4}$

и $\delta = 4,4 \cdot 10^7$ См/м соответственно. Обозначения на рис. 2 аналогичны обозначениям рис. 1. Хорошее качественное и количественное совпадение кривых 2 и 2' рис. 2 свидетельствует о применимости методики расчета собственной добротности H_{111} -колебания в ВКР, изложенной в работе [3] для обоих случаев с сильно отличающимся отношением диаметров проводников коаксиальной линии.



а)



б)

Рис. 2. Зависимости добротностей T - и H_{111} -колебаний в ВКР от длины коаксиальной части резонатора

Обращает на себя внимание разный качественный ход зависимостей собственных добротностей колебаний T - и H - типа в ВКР от величины l . Кривые 1 (рис. 2) имеют близкий к линейному характер, причем максимальные значения добротности T -колебания для обоих наборов МДЭ составляют ~ 4000 .

В случае H_{111} -колебания кривая 2 рис. 2, а добротности для $2a = 2,5$ мм выше кривой 2 рис. 2, б, соответствующей $2a = 5,9$ мм, что свидетельствует о понижении добротности колеба-

ния с увеличением диаметра внутреннего проводника коаксиала. Отличия экспериментальных величин Q H_{111} -колебания от расчетных значений для обоих наборов МДЭ находится в пределах $0,5 \div 9\%$, причем они тем меньше, чем больше длина МДЭ.

Таким образом, закономерности рис. 1 и 2 характеризуют возможности изменения зависимостей собственных резонансной частоты и добротности колебаний T или H_{111} в ВКР см диапазона. Несомненным преимуществом этих колебаний является их максимальная низкочастотность в данном резонаторе. В зависимости от конкретной практической задачи можно выбирать тот или иной тип резонансного колебания в ВКР, причем в одной и той же конструкции резонатора можно возбуждать T - или H -колебание. В процессе экспериментальных исследований было выявлено, что во всем диапазоне изменения параметров резонатора оба типа колебания были устойчивыми и не оказывали влияние друг на друга даже в непосредственной близости по резонансной частоте. Эффективность возбуждения T - или H -колебания может быть легко обеспечена выбором устройства его локального возбуждения.

1. Makeev Yu G., Motornenko A. P. Waveguide-coaxial resonator // 4-th International Kharkov Symposium «Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves». – Kharkov, 2001. – 1. – P. 708–709.
2. Макеев Ю. Г., Моторненко А. П. Магнитные типы колебаний в резонаторе на отрезках запердельного круглого волновода и коаксиальной линии // Журн. техн. физики. – 2003. – 73, № 4. – С. 113–116.
3. Моторненко А. П., Белоус Р. И., Мартынюк С. П. Характеристики колебаний магнитного типа в волноводно-коаксиальном резонаторе // Радиотехника. – 2005. – № 143. – С. 12–16.
4. Белоус Р. И., Моторненко А. П., Скуратовский И. Г., Хазов О. И. Волноводно-коаксиальный резонатор миллиметрового диапазона // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – 49, № 8. – С. 55–60.
5. Моторненко А. П., Скуратовский И. Г., Мартынюк С. П. Исследование особенностей TEM -колебаний в волноводно-коаксиальном резонаторе // Радиотехника. – 2008. – № 153. – С. 61–64.

T - AND H -OSCILLATIONS IN WAVEGUIDE-COAXIAL RESONATOR

S. P. Martynyuk, A. P. Motornenko,
I. G. Skuratovskiy, O. I. Hazov

T - and H -oscillations in the waveguide-coaxial resonator (WCR) have been investigated. The numerical calculations of the dependences of the T - and H -oscillations eigen frequencies and the H -oscillations eigen Q -factors on resonator parameters have been carried out. The experimental investigations of the T - and H -oscillations have been carried out in integrated composite model of the WCR. The calculated data go with experimental data.

Key words: waveguide-coaxial resonator, T - and H -oscillations, eigen frequency, eigen Q -factor.

T - і H -КОЛИВАННЯ В ХВИЛЕВІДНО-
КОАКСІАЛЬНОМУ РЕЗОНАТОРІ

С. П. Мартинюк, О. П. Моторненко,
І. Г. Скуратовський, О. І. Хазов

Досліджено характеристики T - і H -коливань в хвилевідно-коаксіальному резонаторі (ХКР). Проведені числові розрахунки залежностей власних частот T - і H -коливань, а

також власних добротностей H -коливань від параметрів резонатора. Експериментальні дослідження T - і H -коливань виконані на єдиному складовому макеті ХКР 3-см діапазону. Результати розрахунків добре погоджуються з експериментальними даними.

Ключові слова: хвилевідно-коаксіальний резонатор, T - і H -коливання, власна частота, власна добротність.

Рукопись поступила 11 декабря 2008 г.