

Исследование колебаний магнитного типа в волноводно-коаксиальном резонаторе

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

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

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2008 г.

Исследованы электрические характеристики основного низшего резонансного колебания магнитного типа H_{111} в волноводно-коаксиальном резонаторе (ВКР). Получены расчетные зависимости собственных частот и добротностей колебания H_{111} от геометрических параметров резонатора для разных значений относительной диэлектрической проницаемости материала, заполняющего коаксиальную часть ВКР. Приведены результаты экспериментальных исследований макета ВКР 3-сантиметрового диапазона. Получено хорошее соответствие результатов расчета и эксперимента.

Введение

Резонансные колебательные структуры являются наиболее значительным классом радиотехнических устройств, составляющих основу современной СВЧ техники и прикладной радиоэлектроники. Тем не менее параметры существующих резонаторов в ряде случаев ограничивают практические возможности разработанных приборов и радиотехнических систем различного назначения. В связи с этим до настоящего времени актуальной проблемой остаются поиск физических механизмов построения новых резонаторов, а также проведение исследований, направленных на улучшение тех или иных параметров известных типов резонаторов. Например, в работе [1] предложена миниатюрная резонансная структура в диапазоне частот $20 \div 30$ ГГц на основе медных квазипланарных элементов с использованием техники последовательного металлического напыления. В работе [2] теоретически и экспериментально исследованы дисперсионные резонансные характеристики

мод шепчущей галереи в дисковом диэлектрическом резонаторе с малой величиной отношения высоты к радиусу диска.

В работе [3] построена электродинамическая модель расчета волноводного разветвления из прямоугольных волноводов с анизотропным диэлектрическим заполнением.

В работе [4] описана новая разновидность резонансной структуры СВЧ диапазона волноводно-диэлектрического типа, использующая особенности затухающих типов колебаний. Предложенный резонатор, названный волноводно-коаксиальным резонатором (ВКР), сочетает в себе свойства волноводно-диэлектрического резонатора (ВДР) на круглом запердельном волноводе и коаксиального резонатора. Такой резонатор является малогабаритным, имеет разреженный спектр собственных колебаний и может эффективно работать на основных низших типах колебаний, имеющих высокую добротность.

В работах [5-7] изложены методики расчета собственных частот и добротностей ко-

лебаний магнитного типа в ВКР, обусловленных волноводными волнами в коаксиальной линии.

В настоящей работе представлены результаты исследования основного низшего колебания магнитного типа в ВКР сантиметрового диапазона. Проведены численные расчеты собственных частот f и добротностей Q колебания H_{111} в ВКР в зависимости от длины отрезка коаксиальной линии и диаметра ее внутреннего проводника для различных величин относительной диэлектрической проницаемости ϵ материала диэлектрика, заполняющего коаксиальную часть резонатора. Результаты расчетов величин f и Q в случае, когда коаксиальная часть заполнена тefлоном, сопоставлены с экспериментальными данными исследования макета ВКР 3-сантиметрового диапазона.

Устройство ВКР. Методики исследований

ВКР представляет собой отрезок круглого волновода с внутренним диаметром $2b$, в который помещен металло-диэлектрический элемент (МДЭ), длина которого меньше длины отрезка волновода (см. вставку на рис. 1, б). МДЭ состоит из диэлектрической втулки с наружным диаметром $2b$ и длиной l и аксиально-симметрично расположенного в ней металлического стержня диаметром $2a < 2b$ также длиной l . При помещении МДЭ в круглый волновод образуется отрезок коаксиальной линии, окруженный с обеих сторон отрезками волновода. Эти волноводы являются запредельными для резонирующих типов колебаний. Как показали предварительные эксперименты [1], в рассматриваемой структуре могут возбуждаться резонансные колебания коаксиального резонатора (колебания T , H или E). На свойства этих колебаний оказывают влияние запредельные участки волноводов, которые и обуславливают особенности резонатора.

В работе [5] приведена методика расчета спектра собственных частот колебаний магнитного типа в ВКР. Решение задачи о спектре

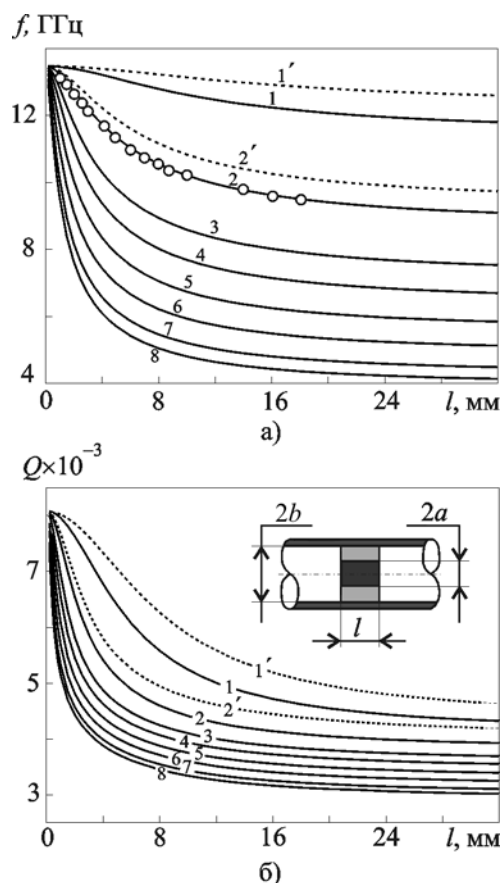


Рис. 1. Расчетные зависимости резонансной частоты (а) и добротности (б) колебания H_{111} в ВКР от длины коаксиальной части резонатора. Кривым 1-8 соответствуют значения: $\epsilon_1 = 1.2$, $\epsilon_2 = 2.05$, $\epsilon_3 = 3.0$, $\epsilon_4 = 3.8$, $\epsilon_5 = 5.0$, $\epsilon_6 = 6.5$, $\epsilon_7 = 8.5$, $\epsilon_8 = 10.0$; кривым 1' и 2' – $\epsilon_1 = 1.2$ и $\epsilon_2 = 2.05$, но для колебания H_{111} в ВДР; светлые кружки – данные эксперимента

собственных частот колебаний H_{mnd} в исследуемом резонаторе было проведено методом частичных областей с привлечением проекционной процедуры и векторных собственных функций при получении системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Задача решена в предположении пренебрежимо малых потерь в диэлектрике и бесконечной проводимости металлических поверхностей. Электромагнитные поля в каждой из областей ВКР записывались с помощью магнитного вектора Герца. В результате удовлет-

ворения граничным условиям была получена система четырех функциональных уравнений, содержащая амплитуды электромагнитных полей. Приведение этой системы к СЛАУ выполнялось с помощью проекционной методики, детально описанной в работе [5]. В результате были получены две СЛАУ второго рода. Резонансные частоты колебания $H_{mn\delta}$ определяются из условия равенства нулю определителя системы двух алгебраических уравнений, соответственно для нечетного ($\delta = 1, 3, 5, \dots$ – число вариаций поля вдоль оси z) и четного ($\delta = 2, 4, 6, \dots$) колебания.

Основным наиболее низкочастотным колебанием магнитного типа в рассматриваемом резонаторе является колебание H_{111} .

Дисперсионное уравнение для этого колебания имеет относительно простой вид:

$$\cos\left(\beta_{11} \frac{l}{2}\right) - \alpha_{11} \frac{\beta_{11}}{\gamma_{11}} \sin\left(\frac{\beta_{11} l}{2}\right) = 0. \quad (1)$$

В этом уравнении $\beta_{11} = \sqrt{k^2 \epsilon - \zeta_{11}^2}$ и $\gamma_{11} = \sqrt{g_{11}^2 - k^2}$ – продольные, а ζ_{11} и g_{11} – поперечные волновые числа волны H_{11} в коаксиальной линии и круглом волноводе соответственно; $k = \frac{2\pi f}{c}$, где f – резонансная частота, c – скорость света в вакууме, а ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего коаксиальную линию;

$$\alpha_{11} = \frac{\Psi_{11}^2}{R_{11} N_{11}}, \quad N_{11} = \frac{g_{11}^2 b^2 - 1}{2} J_1^2(g_{11} b),$$

$$\Psi_{11} = L_1 \frac{g_{11} a \zeta_{11}^2}{g_{11}^2 - \zeta_{11}^2} J_1'(g_{11} a),$$

$$R_{11} = \frac{\zeta_{11}^2 b^2 - 1}{2} L_2^2 - \frac{\zeta_{11}^2 a^2 - 1}{2} L_1^2,$$

$$L_1 = J_1(\zeta_{11} a) - \frac{J_1'(\zeta_{11} a)}{N_1'(\zeta_{11} a)} N_1(\zeta_{11} a),$$

$$L_2 = J_1(\zeta_{11} b) - \frac{J_1'(\zeta_{11} b)}{N_1'(\zeta_{11} b)} N_1(\zeta_{11} b),$$

J_1 , N_1 и J_1' , N_1' – функции Бесселя I и II рода и их производные соответственно.

Уравнение (1) использовалось в настоящей работе при расчетах резонансной частоты колебания H_{111} в ВКР в зависимости от параметров резонатора.

В работах [6, 7] изложена методика расчета собственной добротности колебания $H_{mn\delta}$ в ВКР. Необходимые соотношения для добротности Q основного низшего колебания H_{111} были получены с привлечением понятия частичных добротностей, обусловленных запасенной энергией и потерями в различных областях резонатора:

$$Q^{-1} = Q_d^{-1} + \sum_{i=1}^4 Q_i^{-1}, \quad (2)$$

где $Q_d = \frac{\omega W}{P_d}$, $Q_i = \frac{\omega W}{P_i}$. Величина частичной добротности Q_d ограничена потерями в диэлектрике, Q_1 – потерями на торцах внутреннего проводника коаксиала, Q_2 и Q_3 – потерями в цилиндрических частях внутреннего проводника коаксиала и отрезка волновода длиной l , а Q_4 обусловлена потерями энергии в двух запердельных участках волновода. Полная запасенная энергия W во всем объеме резонатора вычислялась с использованием выражения

$$W = \frac{\epsilon_g \epsilon_0}{2} \int |E|^2 dv, \quad (3)$$

а потери определялись по формулам:

$$P_d = \frac{\omega \epsilon}{2} \text{tg} \delta \int |E|^2 dv, \quad (4)$$

$$P_i = \frac{R_s}{2} \oint_s |H|^2 ds, \quad i = 1, 2, 3, \quad (5)$$

где ϵ_g и $\operatorname{tg}\delta_g$ – соответственно диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь слоя диэлектрика в МДЭ, R_s – поверхностное сопротивление металлических частей резонатора, ω – круговая резонансная частота, а ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Уравнения (2)–(5) использовались в настоящей работе для расчетов значений добротностей колебания H_{111} в ВКР в зависимости от его параметров. В явном виде выражения для W , P_d и P_i приведены в [6, 7], по причине громоздкости здесь они не приводятся.

Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен макет ВКР 3-сантиметрового диапазона. Он состоял из отрезка круглого волновода из бескислородной меди с внутренним диаметром $2b = 13.05$ мм и длиной 70 мм. В этот отрезок поочередно вставлялись элементы из двух наборов МДЭ. Каждый элемент представлял собой медный стержень, плотно и аксиально-симметрично вставленный во втулку из тефлона. Первый набор состоял из элементов со стержнями одинакового диаметра $2a = 2.5$ мм, но разной длины ($l = 1 \div 18$ мм), причем длины каждой втулки и каждого стержня совпадали. Второй набор – из МДЭ одинаковой длины $l = 8.7$ мм, но со стержнями разного диаметра ($0 \leq 2a \leq 10$ мм). С помощью этих двух наборов МДЭ изучались характеристики ВКР в зависимости от значений l и $2a$. Как указывалось ранее, помещение МДЭ в волновод приводило к образованию отрезка коаксиальной линии и двух отрезков волноводов, запердельных для резонирующих колебаний. В один из отрезков волновода помещалась петля связи резонатора с измерительным трактом. Изменением длины участка запердельного волновода (расстояния от этой петли до МДЭ в ВКР) достаточно легко устанавливалась величина связи ниже критической, при которой производились измерения характеристик резонатора. В процессе экспериментов выходной канал второго запердельного волновода оставался открытым (его можно также закрыть заглушкой). В слу-

чае практического использования ВКР в этот волновод можно помещать короткозамыкающий (КЗ) поршень для плавного изменения частоты резонатора.

Измерительный тракт был стандартным, основными элементами его являлись панорамный измеритель коэффициента стоячей волны и ослаблений типа Р2-61 и частотомер типа ЧЗ-54.

Размеры резонатора (волновода и образцов МДЭ) были выполнены с погрешностью ± 0.01 мм, а резонансная частота измерялась частотомером с точностью ± 5 МГц, что обеспечило возможность определения значений собственной частоты f и добротности Q колебания H_{111} с погрешностью 0.1 % и $5 \div 10$ % соответственно.

Результаты численных расчетов и экспериментальных исследований

На рис. 1, а приведены расчетные зависимости собственной резонансной частоты колебания H_{111} в ВКР от длины l МДЭ при $2a = 2.5$ мм для ряда значений относительной диэлектрической проницаемости ϵ материала, заполняющего коаксиальную часть резонатора. Данные, использованные при расчетах: $2b = 13.05$ мм, $\sigma = 5.8 \cdot 10^7$ См/м, $\epsilon_1 = 1.2$, $\epsilon_2 = 2.05$, $\epsilon_3 = 3.0$, $\epsilon_4 = 3.8$, $\epsilon_5 = 5.0$, $\epsilon_6 = 6.5$, $\epsilon_7 = 8.5$, $\epsilon_8 = 10.0$. Как видно, значение ϵ_1 близко к значению диэлектрической проницаемости пенопласта, ϵ_2 – тефлона, а ϵ_4 – плавленого кварца.

Для сравнения на этом же рисунке приведены аналогичные зависимости для ВДР на отрезке запердельного круглого волновода выбранного диаметра, при этом $2a = 0$, $\epsilon_1 = 1.2$ и $\epsilon_2 = 2.05$. Светлыми кружками на кривой 2 отмечены экспериментальные значения резонансной частоты колебания H_{111} , полученные на макете резонатора.

На рис. 1, б показаны аналогичные зависимости собственных добротностей колебания H_{111} в ВКР, а также в ВДР (обозначения кривых те же, что и на рис. 1, а). Для удобства

сравнения кривых добротностей тангенс угла диэлектрических потерь для всех диэлектриков был выбран одинаковым и равным $\text{tg}\delta = 1 \cdot 10^{-4}$.

Как видно из рис. 1, уменьшением длины МДЭ можно повышать резонансную частоту резонатора, причем добротность колебания H_{111} в ВКР при этом увеличивается. Эффективность перестройки частоты тем выше, чем больше значение ϵ , и в ВКР выше, чем в ВДР. Расчетная зависимость резонансной частоты от l достаточно хорошо совпадает с полученными экспериментальными данными (кривая 2 на рис. 1, а).

Семейства кривых рис. 2 характеризуют зависимости величин f и Q колебания H_{111} в ВКР от диаметра внутреннего проводника коаксиальной линии при $l = 8.7$ мм для ряда значений ϵ . Кривым 1-8 на этом рисунке соответствуют те же значения $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_8$, что кривым на рис. 1. На расчетной кривой 2 (рис. 2, а) темными кружками отмечены экспериментальные значения резонансной частоты при разных диаметрах $2a$ отрезка коаксиальной линии. ВДР соответствуют значения f и Q на оси ординат (при $2a = 0$).

По рис. 2 легко оценить влияние на характеристики колебания H_{111} в ВКР (f и Q) диаметра внутреннего проводника коаксиальной линии для разных ϵ .

Возможности плавного изменения резонансной частоты ВКР путем приближения КЗ поршня к МДЭ (до его соприкосновения) можно оценить по экспериментальной зависимости, отмеченной пунктирной кривой 2' на рис. 2, а. Из сравнения кривых 2 и 2' следует, что с увеличением диаметра $2a$ степень плавной перестройки частоты возрастает.

Представляет интерес сравнить расчетные значения собственных добротностей колебания H_{111} в ВКР с экспериментальными данными, полученными на макете ВКР. Для этого в случае заполнения резонатора тефлоном при вычислении величины Q были использованы реальные значения тангенса угла потерь диэлектрика и проводимости метал-

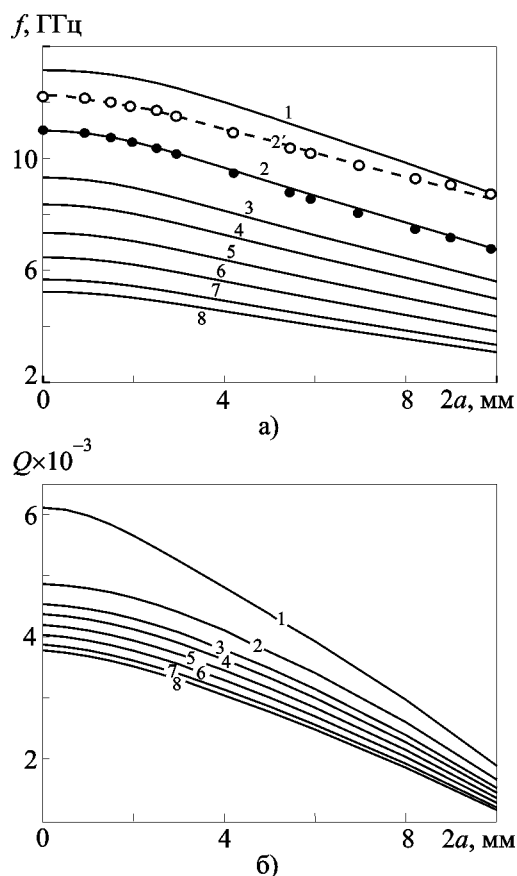


Рис. 2. Расчетные зависимости резонансной частоты (а) и добротности (б) колебания H_{111} от диаметра внутреннего проводника коаксиала. Для кривых 1-8 значения $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_8$ те же самые, что для кривых на рис. 1; темные кружки и светлые кружки – данные эксперимента в отсутствие КЗ поршня и при его соприкосновении с МДЭ соответственно

лических стенок резонатора: $\text{tg}\delta = 1.7 \cdot 10^{-4}$ и $\sigma = 4.4 \cdot 10^7$ См/м.

На рис. 3 и рис. 4 приведены расчетные зависимости Q от l и $2a$ соответственно. Темными кружками на этих рисунках отмечены экспериментальные значения добротностей. Как видно, имеет место достаточно хорошее совпадение результатов расчета и эксперимента.

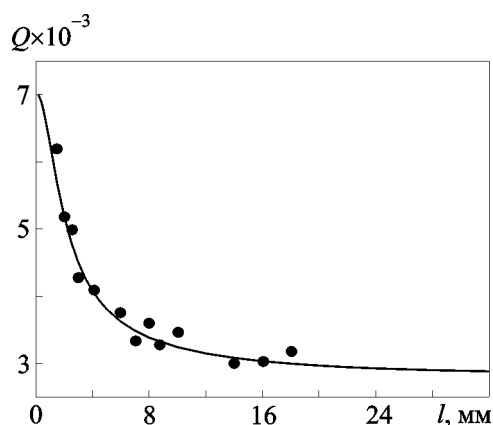


Рис. 3. Расчетная зависимость собственной добротности колебания H_{111} в ВКР с тефлоном от длины МДЭ при $2a = 2.5$ мм; темные кружки – данные эксперимента

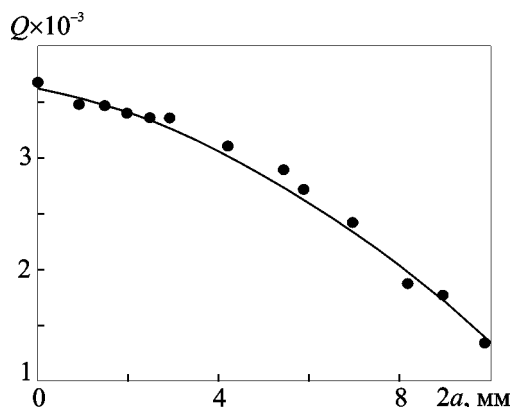


Рис. 4. Расчетная зависимость собственной добротности колебания H_{111} в ВКР с тефлоном от диаметра внутреннего проводника коаксиала при $l = 8.7$ мм; темные кружки – данные эксперимента

Заключение

В работе исследованы характеристики собственных частот и добротностей основного низшего резонансного колебания магнитного типа в ВКР сантиметрового диапазона. Получены семейства расчетных кривых величин f и Q в зависимости от геометрии резонатора для разных значений относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика, заполняющего часть резонатора, которые можно исполь-

зовать на практике при выборе параметров резонатора. Показаны возможности дискретной и плавной перестройки частоты резонатора. Результаты сопоставления расчетных зависимостей с экспериментальными данными для случая ВКР с тефлоном показывают, что имеет место хорошее согласие.

Данный резонатор может быть использован при построении новых конструкций полупроводниковых генераторов гетеродинного типа. Один из вариантов такого генератора представлен в работе [8]. Рассмотренная резонансная структура может быть также использована на практике при определении параметров диэлектрика (величин ϵ и $\text{tg}\delta$) в СВЧ диапазоне в широком интервале частот.

Литература

1. Vanhille K. J., Fontaine D. L., Popovic Z. and Filipovic D. S. Ka-Band Miniaturized Quasi-Planar High-Q Resonators // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2007. – Vol. 55, No. 6. – P. 1272-1279.
2. Гарин Б. М., Мальцев В. П., Мериакри В. В. и др. Спектр мод шепчущей галереи с большим азимутальным индексом в тонких дисковых диэлектрических резонаторах // Радиотехника и электроника. – 2008. – Т. 53, №3. – С. 303-310.
3. Стрижаченко А. В. Электродинамика волноводных разветвлений с анизотропным заполнением // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2008. – №8. – С. 55-61.
4. Makeev Yu. G., Motornenko A. P. Waveguide-coaxial resonator // Proc. 4th Int. Symp. "Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves". – Kharkov (Ukraine). – 2001. – Vol. 1. – P. 708-709.
5. Макеев Ю. Г., Моторненко А. П. Магнитные типы колебаний в резонаторе на отрезках запердеального круглого волновода и коаксиальной линии // ЖТФ. – 2003. – Т. 73, №4. – С. 113-116.
6. Моторненко А. П., Белоус Р. И., Мартынюк С. П. Характеристики колебаний магнитного типа в волноводно-коаксиальном резонаторе // Радиотехника. – Харьков: Всеукр. межвед. научно-техн. сб. ХНУРЭ. – 2005. – №143. – С. 12-16.
7. Белоус Р. И., Моторненко А. П., Скуратовский И. Г., Хазов О. И. Волноводно-коаксиальный резонатор миллиметрового диапазона // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – №8. – С. 55-60.
8. Макеев Ю. Г., Мартынюк С. П., Моторненко А. П., Скуратовский И. Г. Твердотельный СВЧ генератор на основе волноводно-коаксиального резонатора // Радиофизика и радиоастрономия. – 2004. – Т. 9, №2. – С. 194-198.

**Дослідження коливань магнітного
типу у хвилеводно-коаксіальному
резонаторі**

**Р. І. Білоус, С. П. Мартинюк,
О. П. Моторненко, І. Г. Скуратовський**

Досліджено електричні характеристики основного найнижчого резонансного коливання магнітного типу H_{111} у хвилеводно-коаксіальному резонаторі (ХКР). Отримано розрахункові залежності власних частот і добротностей коливання H_{111} від геометричних параметрів резонатора для різних значень відносної діелектричної проникності матеріалу, що заповнює коаксіальну частину ХКР. Наведено результати експериментального дослідження макету ХКР 3-сантиметрового діапазону. Одержано добре співпадіння результатів розрахунків та експерименту.

**Investigation of Magnetic Oscillations
in a Waveguide-Coaxial Resonator**

**R. I. Bilous, S. P. Martyniuk,
A. P. Motorненко, and I. G. Skuratovskiy**

The electrical characteristics for the fundamental lowest resonance oscillation of the H_{111} magnetic mode in a waveguide-coaxial resonator (WCR) are investigated. The calculated dependencies of the eigenfrequencies and Q-factors for the H_{111} mode are obtained versus the resonator geometrical parameters for the different values of the relative permittivity of the material filling the WCR coaxial part. The results of the experiments with the WCR of the 3-cm-wavelength band are shown. The computed and experimental data fit closely.