

ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА В ОТРЕЗКЕ КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА

Кунденко Н. П.

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенка**Проведены теоретические и экспериментальные исследования по возбуждению в отрезке круглого волновода, выполненного в центре плоского зеркала резонатора, волны TM_{01} с помощью колебания TEM_{01q}*

Постановка проблемы. Общий недостаток существующих резонансных систем – это излучение энергии во внешнее пространство, что в итоге приводит к значительному снижению добротности. Помимо этого, существенный недостаток такого типа резонаторов – это проблема перестройки частоты. Поэтому при измерении электрофизических параметров веществ с большими потерями необходимо использовать генераторы СВЧ, имеющие большой диапазон перестройки по частоте. А это, в свою очередь, ухудшает точность измерений, поскольку в этом случае нельзя использовать частотную стабилизацию СВЧ генератора, которая легко осуществима при работе на фиксированной частоте. С укорочением рабочей длины волны будут также уменьшаться и размеры самих резонаторов. Все это делает проблематичным использование открытых диэлектрических резонаторов в коротковолновой части миллиметрового и, тем более, в субмиллиметровом диапазонах длин волн.

Анализ последних исследований и публикаций. В миллиметровом диапазоне длин волн ОР является высокочувствительным инструментом для измерения электрофизических характеристик веществ [1, 2]. При проведении исследований используются, как правило, плоские образцы, а в резонаторе возбуждается основное колебание TEM_{00q} . Благодаря применению полусферической геометрии резонатора устраняются ошибки, связанные с определением углового положения образца, поскольку последний в этом случае помещается на плоское зеркало ОР. Образец должен располагаться в максимуме электрической компоненты поля стоячей волны в резонаторе. Это связано с необходимостью обеспечить наибольшую точность измерений. При этом одним из основных условий применимости метода ОР для измерения электрофизических характеристик веществ являются малые потери мощности в измеряемом образце, так как только в этом случае ОР с образцом остается высокодобротной резонансной системой, и сохраняются все преимущества такого метода измерений. Поэтому для диагностики с помощью ОР различных органических растворов толщина образца должна быть меньше величины скин-слоя. В ряде практических случаев бывает необходимо исследовать образцы, имеющие цилиндрическую форму. В этом случае возникает техническая трудность, связанная с расположением такого образца в объеме резонатора, т.к. при каждом измерении последний должен помещаться в область с одной и той же напряженностью электрического поля.

В сантиметровом диапазоне длин волн в качестве резонансной системы используется объемный цилиндрический резонатор с колебанием TM_{010} , кото-

рый как раз и позволяет измерять электрофизические характеристики веществ, имеющих цилиндрическую форму [3]. При этом, если выполняется условие $b \ll a$ (a – радиус резонатора, b – радиус цилиндрического образца), то поле в измеряемом веществе будет однородным [3]. Применение такого резонатора в миллиметровом диапазоне вызывает определенные трудности в связи с уменьшением его геометрических размеров и ростом поверхностного сопротивления металла, из которого он изготовлен [4]. Использование же сверхразмерного объемного резонатора не целесообразно, поскольку в такой резонансной системе кроме основного колебания TM_{010} будут возбуждаться еще и высшие. А это в итоге может привести к неверной трактовке результатов измерений. Поэтому необходимо принимать дополнительные меры для угловой селекции спектра колебаний в таком резонаторе.

Цель статьи. Провести как теоретические, так и экспериментальные исследования по возбуждению в отрезке круглого волновода, выполненного в центре плоского зеркала резонатора, волны TM_{01} с помощью колебания TEM_{01q} .

Основные материалы исследования. Запишем выражение, которое будет определять эффективность возбуждения волны TM_{01} в круглом волноводе с помощью колебания ОР TEM_{01q}

$$\eta = \frac{128}{\pi^2} \tilde{a}^4 \frac{\left| \int_0^1 u^2 \exp(-u^2 \tilde{a}^2) J_1(2,405u) du \right|^2}{(J_2(2,405))^2}. \quad (1)$$

Для эффективного возбуждения волноводной волны TM_{01} с помощью рассматриваемого колебания открытой резонансной системы большое значение имеет не только амплитудное распределение электромагнитных полей в плоскости анализа ($Z = 0$), но и ориентация векторов напряженности электрического поля. Поэтому в качестве следующего шага оценим эффективность возбуждения волны TM_{01} в круглом волноводе с помощью колебания TEM_{01q} ОР, когда учитывается векторный характер электромагнитного поля.

Представим соотношение для амплитудного распределения напряженности электрического поля колебания TEM_{01q} в плоскости $Z = 0$, которое в декартовой системе координат с учетом векторного характера электромагнитного поля имеет вид

$$E_e(\rho, \phi) = A_{01} \frac{\sqrt{2} \rho}{w_0} \exp\left(-\frac{\rho^2}{w_0^2}\right) \left(\rho_0 \cos^2 \phi - \phi_0 \frac{1}{2} \sin 2\phi\right) \quad (2)$$

Запишем выражение которое будет определять эффективность возбуждения волны TM_{01} в круглом волноводе с помощью колебания ОР TEM_{01q} .

$$\eta = 8 \tilde{a}^4 \frac{\left| \int_0^1 u^2 \exp(-u^2 \tilde{a}^2) J_1(2,405 u) du \right|^2}{(J_2(2,405))^2} \quad (3)$$

Нетрудно заметить, что и в этом случае имеет место явно выраженный максимум эффективности возбуждения рассматриваемой волны в круглом волноводе при изменении его радиуса a с помощью колебания TEM_{01q} открытой резонансной системы. И величина η достигает максимального значения, равно-го 0,418, при том же самом значении $\tilde{a} = 1,433$. Однако, при оценке эффективности возбуждения волны в волноводе всегда необходимо учитывать векторный характер электромагнитного поля. Поскольку рассмотрение только амплитудного распределения полей приводит к завышенному значению эффективности возбуждения волноводной волны.

Как показано в работах [4,5] при возбуждении волны TE_{01} в отрезке круглого волновода, выполненного в центре одного из зеркал ОР и содержащего поршень, происходит преобразование колебания резонансной системы TEM_{01q} в аксиально-симметричное колебание TE_{01q} . Аналогичная ситуа-

ция должна иметь место и в рассматриваемой нами резонансной системе. Во-первых, как и в указанных выше работах, так и в нашем случае рассматривается аксиально-симметричная волна в круглом волноводе (в данном случае TM_{01}). При проведении различного рода измерений с использованием такой открытой резонансной системы исследуемый образец должен помещаться на поверхность поршня, который, расположен в круглом волноводе. А именно наличие поршня и является вторым необходимым условием для преобразования колебания ОР TEM_{01q} в аксиально-симметричное. Кроме того, для волн типа TM характерно наличие E_z -компоненты электрического поля.

А поскольку резонатор с отрезком круглого волновода образуют единую электродинамическую систему, то при возбуждении в ОР аксиально-симметричного колебания электрическое поле должно иметь E_z -компонента. Поэтому колебания в такой открытой электродинамической системе необходимо уже классифицировать не как TEM_{01q} , а как TM_{01q} колебания. Следовательно можно сказать, что такой ОР сродни цилиндрическому объемному резонатору, в котором существуют колебания TM_{plq} .

В связи с этим представляет практический интерес рассмотреть эффективность возбуждения волны TM_{01} в круглом волноводе, выполненном в центре плоского зеркала, с помощью аксиально-симметричного колебания TM_{01q} (см. рис. 1б), в которое преобразуется исходное колебание ОР TEM_{01q} (см. рис. 1а) при наличии короткозамыкающего поршня в волноводе.

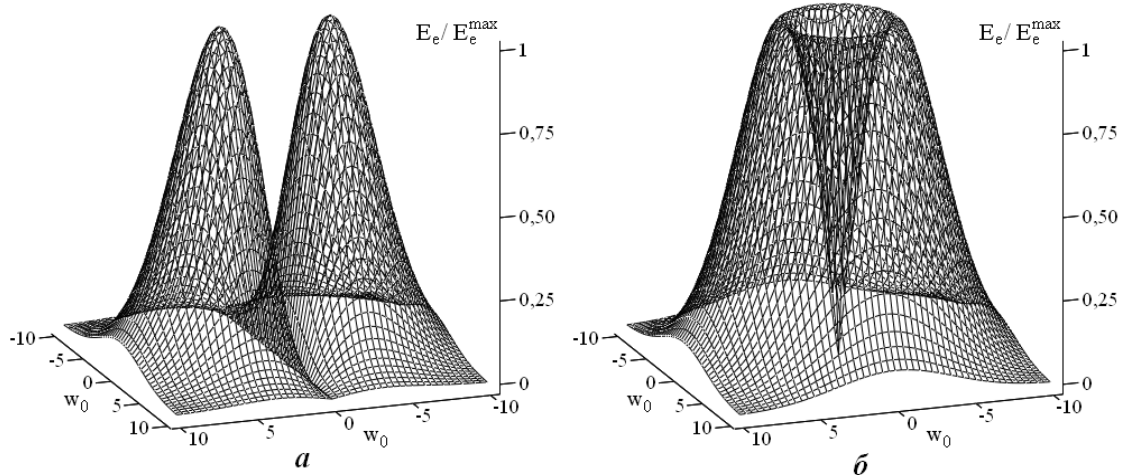


Рисунок 1 - Амплитудное распределение электрического поля колебаний TEM_{01q} (а) и TM_{01q} (б) на плоском зеркале полусферического ОР

В этом случае возбуждающее поле в декартовой системе координат будет иметь вид

$$E_e(x, y) = E_x(x, y)x_0 + E_y(x, y)y_0 \quad (4)$$

где $E_x(x, y)$ и $E_y(x, y)$ - компоненты электрического поля, которые будут определяться соотношениями.

$$E_x(x, y) = A_{01} \frac{\sqrt{2} x}{w_0} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}\right),$$

$$E_y(x, y) = A_{01} \frac{\sqrt{2} y}{w_0} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}\right).$$

Переходя к цилиндрической системе координат и с учетом формул перехода

$$\begin{aligned} x_0 &= \rho_0 \cos \phi - \phi_0 \sin \phi, & y_0 &= \rho_0 \sin \phi + \phi_0 \cos \phi, \\ x &= \rho \cos \phi, & y &= \rho \sin \phi, \end{aligned}$$

получим в окончательном виде выражение, определяющее возбуждающее поле

$$\|E_e(\rho, \varphi)\|^2 = A_{01}^2 \pi \frac{w_0^2}{2}. \quad (5)$$

$$H(\rho, \varphi) = A_{01}^2 B_{01}^2 \frac{2}{w_0^2} 4\pi^2 \left| \int_0^a \rho^2 \exp\left(-\frac{\rho^2}{w_0^2}\right) J_1(\gamma_\perp \rho) d\rho \right|^2. \quad (6)$$

Получим в окончательном виде выражение для эффективности возбуждения волны TM_{01} в круглом волноводе с помощью колебания ОР TM_{01q} ("воловий глаз")

$$\eta = 16 \tilde{a}^4 \frac{\left| \int_0^1 u^2 \exp(-u^2 \tilde{a}^2) J_1(2,405 u) du \right|^2}{(J_2(2,405))^2}, \quad (7)$$

где, как и выше, $u = \rho/a$, $\tilde{a} = a/w_0$.

Результаты расчета по формуле (7) представлены на рис. 2 (кривая 3).

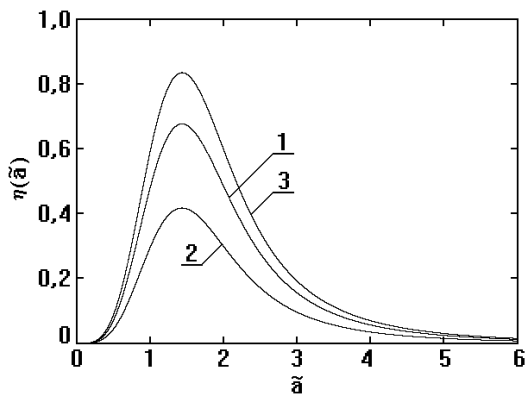


Рисунок 2 - Эффективность возбуждения волны TM_{01} в отрезке круглого волновода, выполненного в центре плоского зеркала ОР, с помощью колебаний TEM_{01q} и TM_{01q} резонансной системы.

Как видно из рисунка, в этом случае эффективность возбуждения рассматриваемой волноводной волны стала существенно выше. При этом, как и в предыдущих случаях, имеется явно выраженный максимум по η , который имеет значение равно 0,835 при $\tilde{a} = 1,433$.

Выводы. Проведено изучение особенностей возбуждения волны TM_{01} в отрезке круглого волновода, выполненного в центре одного из зеркал резонатора, с помощью первого высшего неаксиально-симметричного колебания TEM_{01q} . С помощью метода эквивалентных схем проанализирована эффектив-

ность возбуждения колебаний TEM_{01q} и TM_{01q} в открытой резонансной системе щелевым элементом связи. На основании анализа особенностей возбуждения волны TM_{01} в круглом волноводе с помощью неаксиально-симметричного колебания резонансной системы выявлено, что эта волна будет возбуждаться с максимальной эффективностью при диаметре волновода равном $a/w_0 = 1,433$. А поскольку задачи электродинамики обладают принципом взаимности, то можно утверждать, что с эффективностью равной 0,835 волноводная волна TM_{01} будет возбуждаться в резонансной системе аксиально-симметричное колебание TM_{01q} при указанном выше диаметре круглого волновода.

Список используемых источников

1. Afsar M. N. Millimeter – wave dielectric measurement of materials / M. N. Afsar, K. Button // Proc. of the IEEE. – 1985. – Vol. 73, No. 1. – P. 131–153.
2. Afsar M. N. An automated 60 GHz open resonator system for precision dielectric measurement / M. N. Afsar, X. Li, H. Chi // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 1990. – Vol. 38, No. 12. – P. 1845–1853.
3. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А. А. Брандт. – М.: Госуд. Изд-во физ.-мат. лит-ры, 1963. – 404 с.
4. Kuzmichev I. K. An open resonator for physical studies / I. K. Kuzmichev, P. N. Melezhik, A. Ye. Poyedinchuk // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 2006. – Vol. 27, No. 6. – P. 857–869.
5. Попков А. Ю. Открытый резонатор с отрезком круглого волновода: расчет и эксперимент / А. Ю. Попков, И. К. Кузьмичев // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, № 4. – С. 425–432.

Анотація

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНОГО РЕЗОНАТОРА У ВІДРІЗКУ КРУГЛОГО ХВИЛЕВОДУ

Кунденко М. П.

Проведені теоретичні і експериментальні дослідження по збудженню у відрізку круглого хвилеводу, виконаного в центрі плоского дзеркала резонатора, хвилі TM_{01} за допомогою коливання TEM_{01q} .

Abstract

RESEARCHES OF OPTICAL RESONATOR ARE IN SEGMENT OF ROUND WAVEGUIDE

N. Kundenko

Theoretical and experimental studies are undertaken on excitation in the segment of the round waveguide executed in the center of flat mirror of resonator, wave of TM_{01} , by means of oscillation of TEM_{01q} .