

УДК 621.317, 621.372

РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Ле Ба Хю¹

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Исследуется возможность применения резонансного метода для исследования параметров радиопоглощающих материалов. Для измерения относительной диэлектрической, относительной магнитной проницаемостей, диэлектрических и магнитных потерь образцов в форме стержней используются объемные резонаторы с колебаниями E_{010} и H_{012} . Измерена комплексная диэлектрическая и комплексная магнитная проницаемость радиопоглощающего материала на основе ферроэпоксида на СВЧ.

Ключевые слова: резонансный метод исследования поглощающих материалов, резонансный метод, радиопоглощающие материалы, резонансная частота.

RESONANCE METHOD OF ABSORBING MATERIALS RESEARCH

Le Ba Huy

Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Street, Irkutsk, 664074, Russia.

The article discusses the possibility apply the resonance method to research the parameters of radar absorbing materials. The cavity resonators with swings E_{010} and H_{012} are used to measure the relative dielectric and magnetic permeability, dielectric and magnetic losses of samples in the form of rods. complex dielectric and magnetic permeability of radio absorbing material has been measured on the basis of ferroepoxide on microwave.

Keywords: resonance method to research radar absorbing materials, resonance method, radar absorbing materials, resonant frequency

Введение. В точных радиотехнических измерениях диапазона СВЧ большое значение имеют вопросы согласования устройств волноводного тракта. Важными элементами тракта являются согласованные нагрузки – двухполюсники с близким к нулю коэффициентом отражения в заданном диапазоне частот. Появление отраженной волны в измерительном волноводном тракте связано с нарушением его регулярности. Поэтому согласованная нагрузка должна удовлетворять, как минимум, двум условиям: поглощать энергию электромагнитного поля (преобразовывать ее в тепловую энергию) и не вносить нерегулярность в волновод, т.е. не изменять параметры поперечного сечения волновода, в том числе, параметры среды, заполняющей волновод. Эти требования противоречивы, поскольку воздушная среда, обычно заполняющая волноводный тракт, обладает пренебрежимо малым поглощением, а заполнение волновода поглощающей средой с диэлектрической и магнитной проницаемостями, отличными от параметров воздуха, означает нарушение регулярности волновода на границе раздела сред. Выходом является создание плавно-нерегулярного участка волновода с переходом от воздушного заполнения к заполнению средой с высоким поглощением электромагнитных волн. Это достигается специальной конфигурацией границы раздела сред, в частности, клинообразной (пирамидальной, игольчатой) формой поглощающей вставки в волновод. Уменьшению отражения способствует также приближение модуля характеристического сопротивления поглощающего материала к характеристическому сопротивлению воздуха, заполняющего волновод (около 120π Ом). Для этого поглощающий материал должен быть магнитодиэлектрическим, а его комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости известными из экспериментальных исследований (измерений).

Методы измерения диэлектрических и магнитных параметров можно разделить на резонансные [1, 2] и методы линии передачи [1, 3, 4]. В резонансных методах характеристики исследуемого образца измеряются по изменению резонансной частоты и добротности резонатора после помещения образца в резонатор. Основным достоинством резонансных методов является высокая точность, возможность из-

¹Ле Ба Хю, студент, e-mail: blue.sky.le.huy@gmail.com
Le Ba Huy, a student, e-mail: blue.sky.le.huy@gmail.com

мерения малых диэлектрических потерь и возможность использования в этих целях относительно недорогих скалярных анализаторов СВЧ цепей. Для измерения двух комплексных параметров (четырех вещественных) необходимы характеристические уравнения для резонансных частот двух различных типов колебаний для расчета вещественных частей проницаемостей и два уравнения для добротностей этих колебаний для расчета мнимых частей проницаемостей. Наиболее подходящими типами колебаний являются колебания E_{010} и H_{011} . Структура поля колебаний E_{010} и H_{011} представлена на рис. 1.

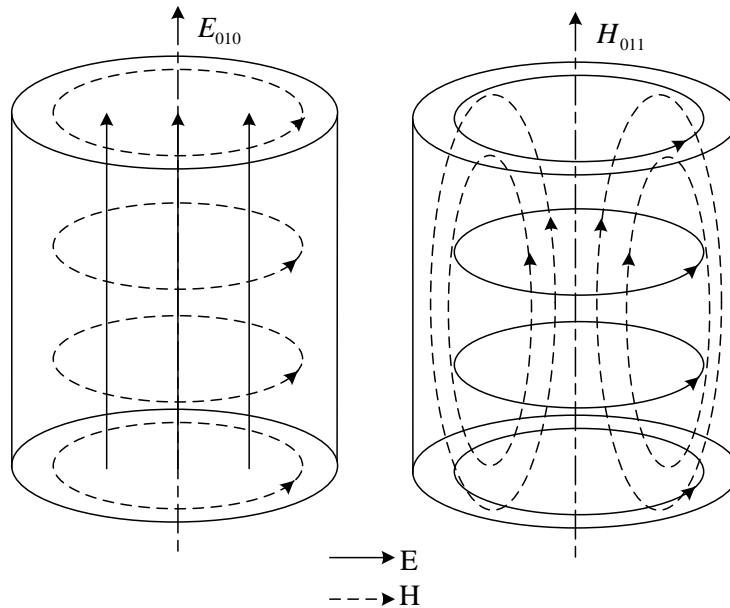


Рис.1. Структура поля колебаний E_{010} и H_{011} в цилиндрических объемных резонаторах

Электродинамическая структура измерительного резонатора представлена на рис. 2.

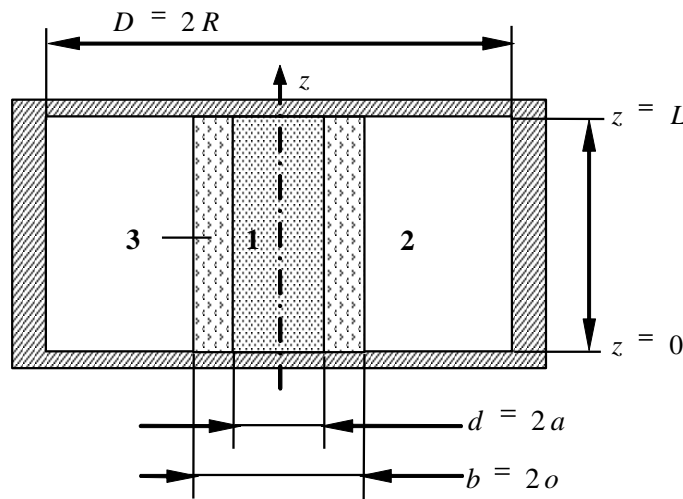


Рис. 2. Электродинамическая структура измерительного резонатора: 1 – исследуемый магнитодиэлектрик; 2 – среда в резонаторе; 3 – оболочка (трубка); a – радиус исследуемого магнитодиэлектрика; o – радиус трубки; R – радиус резонатора

Система уравнений для расчета параметров ϵ_1 и μ_1 образца по резонансным частотам E_{0mp} и H_{0mp} – колебаний.

$$\begin{cases} \left[\frac{\varepsilon_1 \cdot J_1(\chi_1 a)}{\chi_1 a \cdot J_1(\chi_1 a)} = \frac{\varepsilon_3 \cdot Zt_1(\chi_3 a)}{\chi_3 a \cdot Zt_0(\chi_3 a)} \right]_E \\ \left[\frac{\mu_1 \cdot J_1(\chi_1 a)}{\chi_1 a \cdot J_1(\chi_1 a)} = \frac{\mu_3 \cdot Zt_1(\chi_3 a)}{\chi_3 a \cdot Zt_0(\chi_3 a)} \right]_H \end{cases} \quad (1)$$

$$Zt_0(\chi_3 r) = J_0(\chi_3 r) + \left(\frac{D}{C} \right)_{E,H} \cdot N_0(\chi_3 r)$$

где

$$Zt_1(\chi_3 r) = J_1(\chi_3 r) + \left(\frac{D}{C} \right)_{E,H} \cdot N_1(\chi_3 r)$$

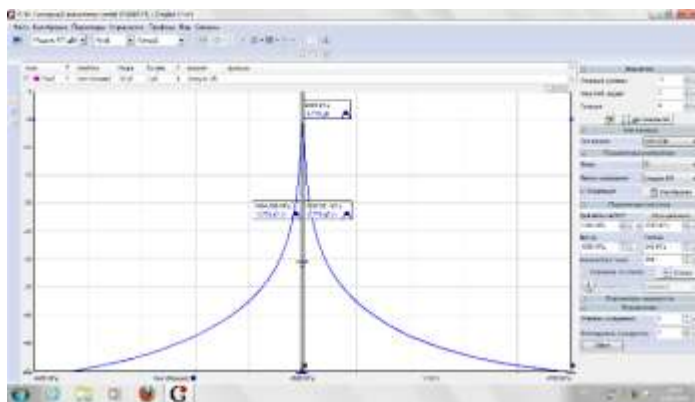
J_0 - функция Бесселя

N_0 - функция Неймана

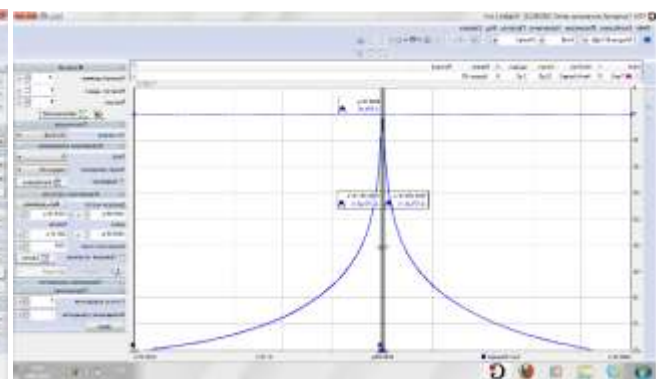
Экспериментальная установка с E-резонатором



Рис. 3. Экспериментальная установка с E-резонатором

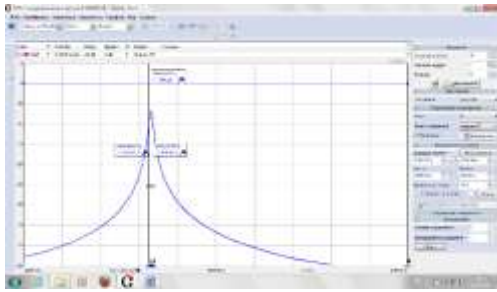


Пустой резонатор
 $f_0 = 4585$ МГц
 $Q = 7466$

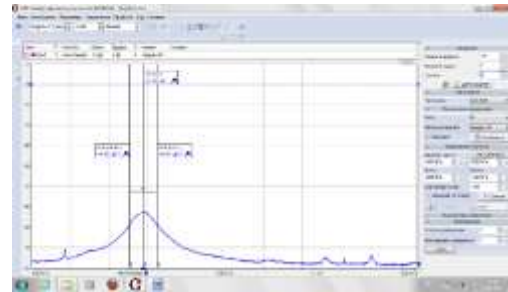


Резонатор с пустой трубкой
 $f_0 = 4559$ МГц
 $Q = 7397$

Рис. 4. Экспериментальные характеристики пустого E-резонатора



Эпоксидный компаунд в трубке
 $f_0 = 4544$ МГц, $Q = 2493$



Ферроэпоксид в трубке,
 массовое отношение карбонильного железа и
 эпоксидной смолы 3,5 : 1
 $f_0 = 4375$ МГц, $Q = 100$

Рис. 5. Характеристики E-резонатора с эпоксидным компаундом и ферроэпоксидом в трубке

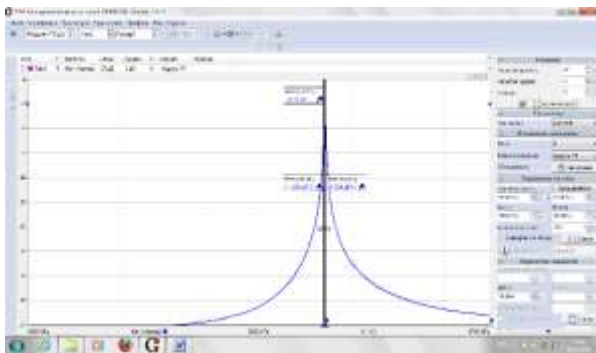


а

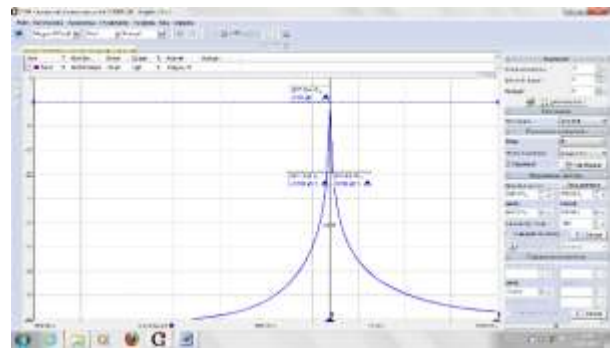


б

Рис.6. Экспериментальная установка (а) с H-резонатором (б)

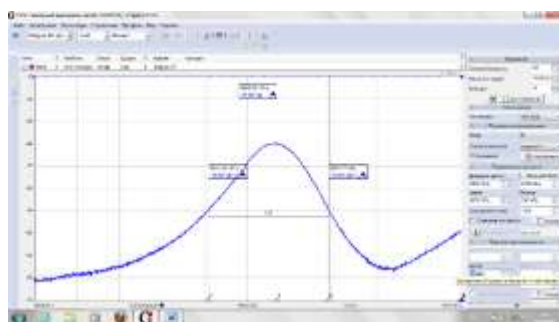


Пустой резонатор
 $f_0 = 9678,534$ МГц, $Q = 26495$



Пустая трубка в резонаторе
 $f_0 = 9677,734$ МГц, $Q = 24906$

Рис. 7. Характеристики резонатора H_{012}



Ферроэпоксид в трубке,
 массовое отношение карбонильного железа и эпоксидной смолы 3,5:1
 $f_0 = 9663,601$ МГц , $Q = 172$

Рис. 8. Характеристики H-резонатора с образцом ферроэпоксида в трубке

Экспериментальные результаты

Параметры пустых резонаторов

Колебание	частота	добротность
E_{010}	4,375 ГГц	7466
H_{012}	9,663 ГГц	26495

Экспериментально исследовался ферроэпоксидный стержень $\varnothing 1,7$ мм, полученный заполнением полиэтиленовой трубки наружным диаметром 3 мм. Массовое отношение карбонильного железа и эпоксидного компаунда составляло 3,5:1. Параметры резонаторов с образцом ферроэпоксида в трубке при ведены ниже.

Колебание	частота	добротность
E_{010}	4,375 ГГц	100
H_{012}	9,663 ГГц	172

Расчет электромагнитных параметров образца ферроэпоксида по уравнениям (1) дал результаты:

$$\epsilon_1 = 18,1 \cdot (1 - j \cdot 0,1) , \quad \mu_1 = 1,54 \cdot (1 - j \cdot 0,7) .$$

Выводы

1. Резонансный метод пригоден для измерения электромагнитных параметров радиоматериалов с большим поглощением
2. Получены экспериментальные данные по электромагнитным параметрам ферроэпоксида
3. Для экспериментальной реализации резонансного метода измерения параметров радиопоглощающих материалов необходимы резонаторы с регулируемыми коэффициентами связи с измерительным трактом
4. Коэффициент заполнения измерительного резонатора исследуемым образцом должен быть малым (0.01 ... 0.005)

Библиографический список

1. Федоров Н.Н. Основы электродинамики. М.: Высшая школа, 1980.
2. Баскаков С.И. Основы электродинамики. М.: Сов. радио, 1973.
3. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1989. С. 289–317.
4. Vanzura E.J., Baker-Jarvis J.R., Grosvenor J.H., Janezik M.D. Intercomparison of permittivity measurements using the transmission/reflection method in 7-mm coaxial transmission lines // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1994. Vol. 42, № 11. P. 2063–2070.