

УДК 621.317.74

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВЕЩЕСТВ МНОГОРЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ

Виногородский Д.Ф., Пономаренко В.И., Попов В.В.¹

1. ВВЕДЕНИЕ

Измерения диэлектрической проницаемости имеют материалов как научный аспект, например, при исследованиях релаксационных эффектов в диэлектриках, так и в прикладное значение при разработке устройств техники сверхвысоких частот (СВЧ) [1, 2].

Для измерения материальных констант применяют волноводные и резонаторные методы, метод открытых коаксиальных и волноводных проб, измерения в свободном пространстве [1, 3, 4]. Эти методы имеют свои преимущества и недостатки. Наибольшую точность измерений, при условии высокой точности изготовления образцов, обеспечивают волноводные методы. При этом материальные константы определяются численно по результатам измерения комплексного коэффициента отражения (к.о.) от исследуемого образца, помещенного в волновод.

В работе предложена методика измерения материальных констант твердых, жидких и газообразных сред на основе многорезонансного метода измерения комплексного к.о. в волноводе. Многорезонансный метод измерения комплексного коэффициента отражения (к.о.) в волноводе с использованием скалярного анализатора цепей основан на комплексном анализе резонансных характеристик квазирезонатора, образованного отрезком волновода, расположенным между индуктивной диафрагмой и исследуемым объектом [5, 6].

2. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Блок-схема автоматизированной измерительной установки на основе панорамного измерителя КСВн и ослабления P2-54/3 изображена на рис. 1. Установка включает в себя генератор качающейся частоты ГЧ-61, две разделенные индуктивной диафрагмой волноводные секции С1, С2 с направленными ответвителями НО1, НО2, волноводную секцию С3, которая является держателем отражающего объекта, и индикатор Я2Р-67, связанный с компьютером через устройство сопряжения УС. Устройство сопряжение выполнено на базе микросхемы ADS7862, представляющей собой двухканальный 12-ти разрядный аналогово-цифровой преобразователь.

¹ ТНУ, кафедра экспериментальной физики. e-mail: slava_popov@front.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВЕЩЕСТВ
МНОГОРЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ**

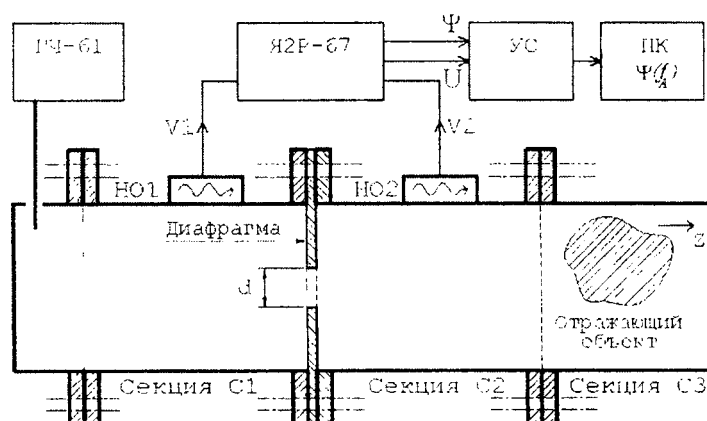


Рис. 1 Многорезонансная измерительная установка.

Блок сравнения индикатора вырабатывает сигнал $\Psi(f)$, где f – частота, пропорциональный отношению V_2/V_1 сигналов с детекторов направленных ответвителей. Зависимость $\Psi(f)$ имеет многорезонансный характер. Резонансные частоты и ширины резонансных пиков функции $\Psi(f)$ содержат в себе, как показано в [5], информацию, достаточную для вычисления частотной зависимости $R(f)$, где R – комплексный коэффициент отражения от исследуемого образца.

В работе [5] приводятся результаты компьютерного моделирования и экспериментальные измерения, позволяющие оценить точность многорезонансного метода. При использовании скалярного анализатора цепей типа Р2-54/3, точность метода составляет около 0.01 по модулю к.о. и 1.0-1.5 градуса по фазе.

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Для измерения диэлектрической проницаемости ε образца в виде пластины толщиной d_1 , перегородивающей волновод, применялась секция-держатель, рис. 2, которая помещалась к фланцу секции 2 (рис. 1) в качестве отражающего объекта. К держателю присоединена поршневая секция, что позволяет менять положение плоскости короткого замыкания z' . Между пластиной и поршнем находится воздух, $\varepsilon_2 = 1$.

Сдвиг Δ между «виртуальной» плоскостью короткого замыкания z' и механической плоскостью поршня P учитывался следующим образом. Поршневая секция присоединялась к плоскости фланца секции 2 (рис. 1) и измерялись резонансные частоты, причем механическая плоскость поршня P устанавливалась в той же плоскости. Затем вместо поршня устанавливалась неподвижная короткозамыкающая пластина, и также измерялись резонансные частоты. По сдвигам резонансных частот определялась зависимость величины Δ от частоты.

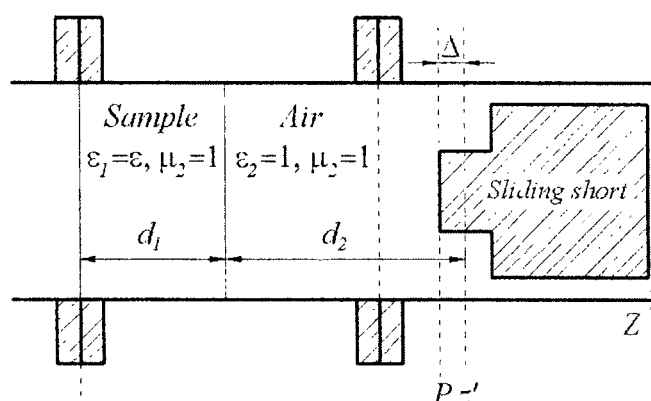


Рис. 2 Секция-держатель образца и подвижный короткозамыкатель.

Решение задачи отражения приводит к уравнению:

$$(*) \quad i \frac{R+1}{R-1} = \frac{k_1 \Psi_2 + k_2 \Psi_1}{k_1 k_2 - k_1 \Psi_1 \Psi_2},$$

$$k = \sqrt{k_0^2 - (\pi/a)^2}, \quad k_{1,2} = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_{1,2} - (\pi/a)^2}, \quad \Psi_{1,2} = \operatorname{tg}(k_{1,2} \cdot d_{1,2}).$$

Измерив к.о. R при двух различных значениях расстояния d_2 , получим из (*) систему двух уравнений с двумя неизвестными k_1 и Ψ_1 . Вычислив величину k_1 , определим из нее диэлектрическую проницаемость образца ε .

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Были измерены проницаемости «пластины» воздуха и фторопласта. Для слоя воздуха толщиной $d_1 = 10.02$ мм получено $\varepsilon' = 1.00 \pm 0.01$, $\varepsilon'' = 0.00 \pm 0.01$. Для пластины фторопласта толщиной 4.14 мм получено $\varepsilon' = 2.07 \pm 0.02$, $\varepsilon'' = 0.00 \pm 0.01$, что хорошо согласуется с [4].

Отметим, что при измерении материальных констант образцов в виде пластин точность позиционирования образца, точность учета его толщины и допустимая величина зазора между образцом и стенками волновода должна соответствовать стандартным требованиям, предъявляемым волноводным методам [7].

Предложенный метод был применен для измерения диэлектрической проницаемости спирта $\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$. Измерения проводились также с использованием держателя, изображенного на рис. 2. Спирт занимал весь объем секции-держателя образца. Аналогично [8], для удержания спирта внутри секции-держателя ее фланцы заклеивались скотчем. Спирт вводился в держатель через малое отверстие в его верхней стенке с помощью шприца, толщина «пластины» из спирта составила 2.98 мм. Толщина скотча, после удаления путем растворения клевого слоя на поверхностях, обращенных внутрь держателя, составила около 0.02 мм. Результаты измерения при температуре 22 °С приведены на рис. 3. Отметим, что величина диэлектрической проницаемости спирта сильно зависит от процентного содержания воды. Для «высушивания» спирта мы

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВЕЩЕСТВ МНОГОРЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ

применяли методику, описанную в [9], которая позволяет достичь содержания воды менее 0.05%.

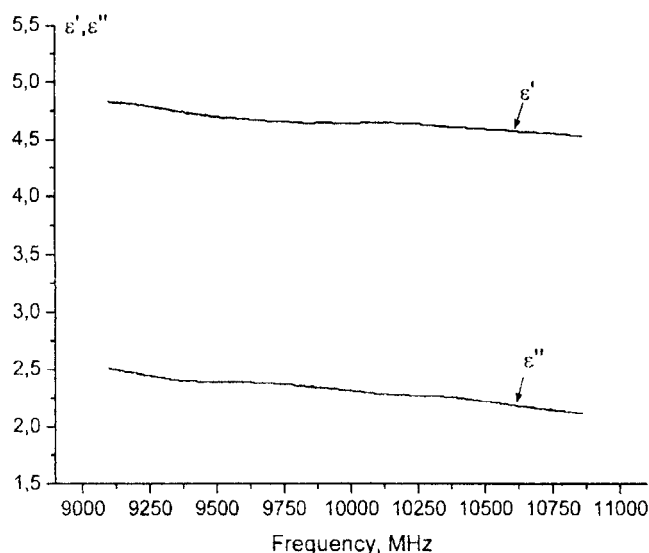


Рис. 3 Спектр диэлектрической проницаемости этилового спирта при 22 °С.

Как показало компьютерное моделирование, погрешность, обусловленная влиянием скотча, составляет около 0.05 для ϵ' и 0.03 для ϵ'' . Погрешности измерения модуля и фазы КО, равные 0.015 и 1.5 град, приводят к погрешности 0.08 как для ϵ' , так и для ϵ'' . Таким образом, погрешность измерения диэлектрической проницаемости спирта можно оценить как 0.13 для ϵ' и 0.11 для ϵ'' . Полученные результаты измерений спирта близки к результатам, полученным в [8].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика измерения на СВЧ дисперсии диэлектрической проницаемости жидких, твердых и газообразных сред. Методика основана на измерении многорезонансным методом комплексного к.о. от исследуемого образца в виде слоя, перекрывающего сечение волновода.

Дисперсионные зависимости диэлектрической проницаемости для воздуха, фторопласта, спирта, а также других сред, полученные с использованием скалярного анализатора цепей типа P2-54/3, близки к тем, которые измерены с использованием современных векторных анализаторов цепей. Точность методики обеспечивается высокой точностью многорезонансного метода и учетом сдвига отражающей плоскости поршня по отношению к его механической плоскости.

При использовании скалярного измерителя КСВН и ослабления, более современного по сравнению с прибором P2, которым располагают авторы, точность измерений может быть существенно выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. M.N. Afsar, J.R. Birch, R.N. Clarke The measurement of the properties of materials. // Proceedings of IEEE, vol. 74, January 1986, pp. 183 – 199.
2. Roussy G., Chaabane H., Esteban H. Permittivity and permeability measurement of microwave packaging materials. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Volume: 52, Issue: 3, March 2004, p. 903- 907.
3. B. Gestblom, E. Noreland, J. Sjöblom A precision dielectric time domain spectroscopy in the gigahertz range. // J. Phys. Chem., 1987, 91, 6329-6331.
4. D.K. Ghodgaonkar, V.V. Varadan, V.K. Varadan Free-Space Measurement of Complex Permittivity and Complex Permeability of Magnetic Materials at Microwave Frequencies. // IEEE Transaction on Instrumentation and Measurements, vol. 39, no 2, 1990.
5. Пономаренко В.И., Попов В.В. Многорезонансный метод измерения комплексного коэффициента отражения в волноводе. // Приборы и техника эксперимента, №1, 2005.
6. Пономаренко В.И., Попов В.В. Патент Украины №48692А «Устройство для определения комплексного коэффициента отражения в волноводе». Опубликовано 15.08.2002, бюллетень №8.
7. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. // М.: Издательство физико-математической литературы, 1963.
8. Y. Wang, M.N. Afsar Measurement of complex permittivity of liquid dielectrics. // IEEE Microwave and optical technology letters, vol. 34, no 4, 2002.
9. Общий практикум по органической химии. Под редакцией А.Н. Коста. // М.: Мир, 1965.