

УДК 621.317.335

## СВЧ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ

Н.А. ПЕВНЕВА, А.В. ГУСИНСКИЙ, А.Л. ГУРСКИЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 22 мая 2012

Рассмотрен волноводный метод определения диэлектрической проницаемости материалов с использованием панорамного измерителя коэффициента отражения и передачи. Проведена оценка влияния параметров волноводного тракта (линейных размеров, коэффициентов отражения материалов) на точность измерений диэлектрической проницаемости в СВЧ диапазоне.

*Ключевые слова:* диэлектрическая проницаемость, диэлектрический стержень, стоячая волна, коэффициент отражения.

### Введение

Изучение диэлектрических свойств вещества, т. е. исследование поведения его комплексной диэлектрической проницаемости в зависимости от частоты, температуры, давления, напряженности электрического поля и прочих факторов, имеет весьма важное научное и техническое значение. Эти исследования позволяют выявить некоторые закономерности строения молекул, недоступные другим методам, а также дают возможность получить новые необходимые технике изоляционные материалы с заданными свойствами [1].

Выбор метода измерений определяется многими обстоятельствами: частотным диапазоном, свойствами исследуемого материала, необходимостью дополнительных внешних воздействий на образец (температура, излучение, магнитное или электрическое поле и др.). Важно также учитывать, что методы, пригодные для измерения образцов с небольшой величиной проницаемости, оказываются непригодными для образцов с высокими значениями диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь.

Широко известны такие методы изучения свойств материалов с использованием радиоволновой техники, как волноводные, резонансные и свободного пространства [1]. В сантиметровом диапазоне длин волн одним из наиболее удобных и точных методов является волноводный метод с частичным заполнением волновода (метод тонкого стерженька) [2]. В данной работе рассмотрена модификация этого метода с целью увеличения точности и оптимизации математической модели обработки результатов.

### Методика эксперимента и его результаты

В общем случае измерительная установка для реализации метода тонкого стерженька включает: генератор; аттенюатор; вентиль; зонд отбора мощности; волновод; образец; поршень; микрометрический винт; термостатирующая рубашка; термостат; детектор; фильтр СВЧ; измеритель отношений напряжений; частотомер [3]. Диэлектрическая проницаемость вычисляется через определение эквивалентной нормированной проводимости (ее действительной и мнимой составляющих). Реактивная составляющая проводимости определяется по сдвигу положения поршня  $p$  при измерении положения минимума тока без образца и с образцом. Активная часть проводимости определяется через отношение токов, измеренных в максимуме без образца и в минимуме с образцом при квадратичной характеристике детектора [2].

Метод тонкого стерженька базируется на вычислении диэлектрической проницаемости твердых и жидких диэлектриков путем воздействия электромагнитного поля на объект измерения и измерении параметров стоячей волны (ослабления сигнала и его фазы) при закороченном волноводе в присутствии и отсутствии образца. Расчет диэлектрической проницаемости осуществляется через эквивалентную нормированную проводимость.

Основным отличием модифицированного метода тонкого стерженька является то, что для определения активной и реактивной составляющих проводимости с помощью панорамного измерителя проводится измерение коэффициентов отражения в максимуме стоячей волны в отсутствие образца и в минимуме стоячей волны в присутствии и отсутствии образца.

Для реализации данного способа применялась измерительная установка, состоящая из высокоточного генератора качающейся частоты (ГКЧ) с системой автоматического регулирования мощности (АРМ); СВЧ измерительного тракта (1), состоящего из двух последовательно соединенных направленных ответвителей (НО); унифицированного индикатора Я2Р-70; объекта измерения в виде диэлектрического стержня (2); аттенюатора (3) и подвижного поршня (4) (рис. 1).

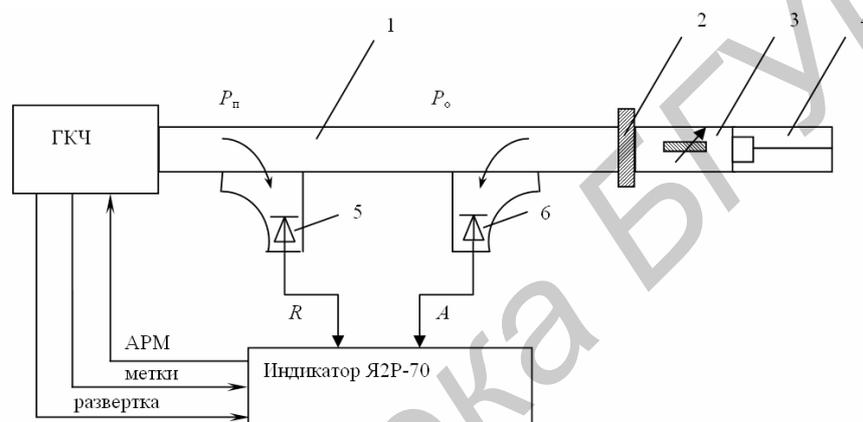


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки

На выходе ГКЧ формируется частотно- и амплитудно- модулированный СВЧ-сигнал постоянного уровня. Постоянство выходной мощности ГКЧ поддерживается с помощью системы АРМ, которая работает по сигналу  $P_n'$ , подаваемому из индикатора в генератор. НО1 отводит сигнал, пропорциональный мощности падающей волны  $P_n$ ; НО2 – мощности отраженной волны  $P_o$ . Сигналы НО детектируются квадратичными детекторами (5, 6). Выходные напряжения детекторов позволяют определить модуль коэффициента отражения и ослабления. Сигналы, пропорциональные коэффициенту ослабления, снимаются с детекторных головок, подключаемых как оконечные нагрузки на выход измеряемого устройства и чувствительных к прошедшей через измеряемый объект СВЧ мощности. Сигналы, пропорциональные коэффициенту отражения, снимаются с детекторов, включенных во вторичные каналы направленных ответвителей и чувствительных к величине отраженной от измеряемого устройства СВЧ мощности [4].

Объект измерения представлял собой полиэтиленовый полый стержень диаметром  $d$ , в который помещается исследуемый материал. Стержень фиксируется в сквозном отверстии со стороны широкой стенки волновода шириной  $a$  (рис. 2). Отношение  $d/a$  может меняться в широких пределах (от 0,12 до 0,05) [2].

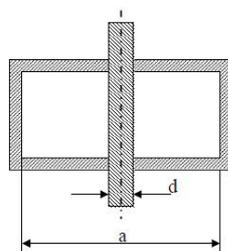


Рис. 2. Поперечное сечение волновода с диэлектрическим стержнем

Способ измерения сводится к определению в прямоугольном волноводе эквивалентной нормированной проводимости некоторой неоднородности, которая вносится в волновод цилиндрическим диэлектрическим стерженьком, помещаемым в центре широкой стенки волновода параллельно вектору напряженности электрического поля волны Н10, распространяющейся в волноводе.

Предполагая, что материал образца обладает комплексной диэлектрической проницаемостью, можно определить ее составляющие через параметры волноводной линии, размеры образца и экспериментально измеренные проводимости  $G$  и  $B$ .

Проводимости  $G$  и  $B$  измеряются с помощью подвижного короткозамыкающего поршня. Реактивная составляющая проводимости  $B$  определяется по сдвигу положения поршня при измерении положения минимума коэффициента отражения без образца и с образцом:

$$B = \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda_g} p, \quad (1)$$

где  $p$  – сдвиг положения поршня;  $\lambda_g$  – длина волны в волноводе.

Активная часть проводимости  $G$  определяется через коэффициенты отражения в максимуме без образца и в минимуме с образцом:

$$G = \frac{1}{\sqrt{10^{\frac{S1-S2}{10}} - 1}}, \quad (2)$$

где  $S1$  и  $S2$  – коэффициенты отражения в децибелах в максимуме без образца и в минимуме с образцом соответственно.

Комплексная диэлектрическая проницаемость и ее составляющие рассчитываются по формулам [1, 2]:

$$\varepsilon = \varepsilon' + \varepsilon'', \quad (3)$$

$$\varepsilon' = 1 + \left[ 2 \left( \frac{\lambda}{\pi d} \right)^2 + 0,5 \right] \cdot \frac{u}{u^2 + v^2}, \quad (4)$$

$$\varepsilon'' = \left[ 2 \left( \frac{\lambda}{\pi d} \right)^2 + 0,5 \right] \cdot \frac{v}{u^2 + v^2}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  – комплексная диэлектрическая проницаемость,  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  – действительная и мнимая составляющая диэлектрической проницаемости соответственно,  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве,  $d$  – диаметр стерженька,  $u$  и  $v$  – переменные, введенные для упрощения выражения, рассчитываемые по формулам:

$$u = 2 \sum_{n=3,5,7,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{\sqrt{n^2 - (2a/\lambda)^2}} - \frac{1}{n} \right] - 1,75 + \ln 4a / \pi d + \frac{2\lambda_g}{a} \frac{B}{B^2 + G^2}, \quad (6)$$

$$v = \frac{2\lambda_g}{a} \frac{G}{B^2 + G^2}, \quad (7)$$

где  $a$  – размер широкой стенки волновода.

Предлагаемый метод измерений основывается на возможности получения информации об активной и реактивной составляющих проводимости через коэффициент отражения стоячей волны в измерительном тракте.

Особенностью предложенной методики измерений является измерение коэффициентов отражения, а не значений токов. При этом вычисление активной части проводимости производится по выведенной в данной работе формуле (2), в отличие от известного метода, где активная часть проводимости определяется через отношение токов, измеренных в максимуме без образца  $I_{\max}$  и в минимуме с образцом  $I_{\min}$ .

$$G = \frac{1}{\sqrt{\frac{I_{\text{макс}}}{I_{\text{мин}}} - 1}}$$

Предполагаемая последовательность операций позволяет не проводить измерение токов и соответственно исключить из установки вентиль; зонд отбора мощности; микрометрический винт; термостатирующую рубашку; термостат; фильтр СВЧ; частотомер. За счет упрощения измерительной установки уменьшается вклад в погрешность измерения, поскольку исключаются несколько инструментальных погрешностей.

В Центре 1.9 «Научно-образовательный инновационный центр СВЧ технологий и их метрологического обеспечения» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники была проведена проверка работоспособности модифицированного метода. Основой измерительной установки, в которой реализован предложенный способ, был скалярный анализатор цепей P2-104, имеющий следующие метрологические характеристики: рабочие диапазоны частот 0,01-18 ГГц; 17,44-25,86 ГГц; 25,86-37,50 ГГц; основная погрешность установки частоты от  $\pm 0,1\%$  до  $\pm 0,5\%$  (в зависимости от диапазона частот); диапазон измерения КСВН 1,1-5,0; диапазон измерения ослабления от 0 до  $-40$  дБ; погрешность измерения КСВН  $\pm(5K+6)\%$ , где  $K$  – величина измеряемого КСВН; погрешность измерения ослабления  $\pm(0,05A+0,5)$  дБ, где  $A$  – величина измеряемого ослабления. Измерения были проведены на частоте 9,5 ГГц.

По результатам исследований опытного образца в виде ацетона сдвиг положения поршня  $p$  составил 3,5 мм, разница S1-S2 равна 6,7 дБ. Рассчитанная комплексная диэлектрическая проницаемость равна 22. Погрешность измерений составляет 2,7%. Табличное значение диэлектрической проницаемости ацетона 21,4.

При исследовании опытного образца в виде трансформаторного масла сдвиг положения поршня  $p$  составил 1,6 мм, разница S1-S2 равна 14,7 дБ. Рассчитанная комплексная диэлектрическая проницаемость равна 2,43. Погрешность измерений составляет 2,9%. Табличное значение диэлектрической проницаемости трансформаторного масла 2,5.

Проведены испытания с опытным образцом в виде этилового спирта. Сдвиг положения поршня  $p$  составил 2,4 мм. Разница S1-S2 равна 5,0 дБ. Рассчитанная комплексная диэлектрическая проницаемость равна 24,8. Погрешность измерений составляет 1,2%. Табличное значение диэлектрической проницаемости этилового спирта 25,1.

Далее эксперимент проводился для солей KCl. По полученным экспериментальным данным были построены зависимости действительной и мнимой составляющих диэлектрической проницаемости (рис. 3) для пяти различных концентраций водных растворов KCl, причем растворы готовились из трех видов руд, концентрация KCl в которых составляла 29, 85 и 96% (определена по данным химического анализа).

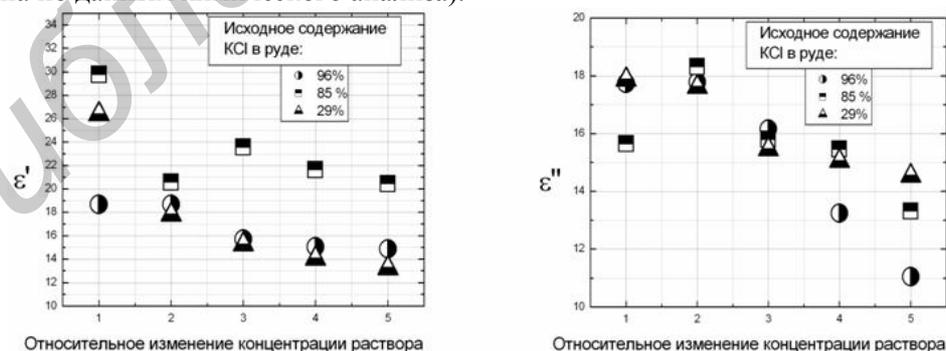


Рис. 3. Результаты расчетов действительной и мнимой составляющих диэлектрической проницаемости водных растворов KCl для различных концентраций растворов

### Заключение

На основе метода диэлектрического стерженька разработана методика анализа процентного содержания KCl в многофазной смеси, которая позволяет существенно снизить тру-

доемкость работы, в сравнении с уже существующими волноводными методами. Данный метод отличается простотой и обеспечивает надежность получаемых результатов при измерении, многократные наблюдения повторяют полученные результаты. Для эксперимента требуется малое количество исследуемого материала (до 0,5 г KCl), что позволяет исследовать вещества, получаемые в малых количествах, а также обеспечить достаточную однородность образцов по объему (при условии размельчения руды до порошкового состояния).

## MICROWAVE METHOD FOR DETERMINATION OF DIELECTRIC PROPERTIES OF LIQUIDS

N.A. PEVNEVA, A.V. GUSINSKII, A.L. GURSKII

### Abstract

The waveguide method for determining the dielectric constant of materials was considered with using a panorama meter of the reflection and transmission coefficients. The influence of the waveguide channel's parameters (linear dimensions, the reflection coefficients of materials) on the accuracy of the permittivity in the microwave range was assessed.

### Список литературы

1. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М., 1963.
2. J. Le Bot, S. Le Montagner. // Comptes Rendus. 1953. P 236-469.
3. Логинова Д.В., Лилеев А.С., Ляценко А.К. // Журн. неорган. химии. 2002. Т. 47, №9. С. 1558-1565.
4. Белошицкий А.П., Гусинский А.В., Кострикин А.М. Метрология и измерения. Измерение параметров цепей с распределенными постоянными. Мн., 1996.