

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СВЧ

К.В. НИКИТЕНКО, Т.А. ПУЛКО, Н.В. КОЛБУН

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

Поступила в редакцию 1 сентября 2008

Измерение действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости в широком диапазоне частот имеет большое значение при выборе электротехнических материалов. Для композиционных и гетерогенных материалов этот параметр является функцией многих переменных — химического состава, структуры, влажности и т.д., представляет достаточные трудности для моделирования и чаще всего определяется экспериментально.

Ключевые слова: СВЧ-излучение, композиционные материалы, диэлектрическая проницаемость.

Введение

В связи с развитием современных технологий, требующих непрерывного контроля за многими параметрами технологического процесса, состоянием оборудования и параметрами материалов и сред становится всё более актуальной задача создания неразрушающих бесконтактных методов измерения и контроля параметров материалов и сред. Измерения на СВЧ позволяют определить электропроводность, толщину, диэлектрическую проницаемость и другие параметры материалов и сред без разрушения поверхности образца, дают возможность автоматизировать контроль параметров материалов.

Анализ современных методов определения диэлектрической проницаемости на СВЧ

Сфера применения диэлектрических материалов в электротехнике достаточно широка, поэтому определение действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости в широком диапазоне частот имеет большое значение. Вместе с тем увеличивается использование композиционных материалов, обладающих особыми свойствами, которые отличаются от параметров отдельных составляющих композита.

Для гетерогенных сред диэлектрические свойства являются функцией многих переменных — химического состава, структуры, влажности, температуры, частоты, агрегатного состояния веществ и т.д. Например, диэлектрическое поведение водных коллоидных растворов определяется структурой коллоидных частиц, а также физико-химическими свойствами коллоидов, такими, как анизотропия, образование мицелл. Особенно сильные изменения температурной зависимости диэлектрической проницаемости наблюдаются при структурных изменениях молекул, при фазовых переходах и т.п. Поэтому моделирование диэлектрических свойств таких материалов в основном опирается на результаты измерений.

Чаще всего определение диэлектрической проницаемости вещества определяется косвенно, с использованием основных уравнений электродинамики, и базируется на измерении параметров электромагнитного излучения (диапазона СВЧ) при его взаимодействии с исследуемым материалом [1].

Существование большого количества методов измерения диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ определяется наличием разнообразных линий передачи, возможностью выбора разных параметров, удобных для измерения, использованием образцов различной формы и выбором места расположения их в системе.

Если исходить из общности физических принципов взаимодействия поля с веществом, то все методы делятся на:

- 1) методы, основанные на изучении поля стоячей волны в исследуемом диэлектрике;
- 2) методы, основанные на рассмотрении волн, отраженных от исследуемого образца;
- 3) методы, основанные на изучении волн, прошедших через диэлектрик;
- 4) резонансные методы.

Первая группа методов имеет простой математический аппарат, а также пригодна для измерения диэлектрической проницаемости жидкостей в широком диапазоне частот. Однако существуют и значительные недостатки, такие, как потребность в большом количестве исследуемого вещества, значительные трудности при исследовании твердых веществ, а также непригодность для измерения ϵ с большими потерями.

Вторая группа методов пригодна для измерения диэлектрической проницаемости как твердых, так и жидких диэлектриков, особенно в сантиметровом диапазоне волн. Однако значительные недостатки ограничивают применение данных методов, а именно требование точной подгонки образца под размеры системы, громоздкость измерительной линии в дециметровом диапазоне волн, сложность выполнения такой линии с подвижным зондом на волнах короче одного сантиметра, а также необходимость решения трансцендентных уравнений и неоднозначность при определении диэлектрической проницаемости.

Большое распространение получили резонансные методы. Отличаются они видом резонансных систем, образованных из различных линий передач, типом возбуждаемых в них колебаний, местом расположения образца в резонаторе и формой самого образца. Данные методы имеют сравнительную простоту и удобство измерений, а также широко применяются в практике СВЧ-измерений. Однако необходимость большой точности изготовления образцов определенной формы, точного определения длины волны, обеспечение большой стабильности источников колебаний и непригодность для измерения диэлектрической проницаемости с большими потерями, а также в широком диапазоне частот также значительно ограничивают область их использования.

Таким образом, любые из упомянутых методов могут быть использованы для измерения диэлектрической проницаемости, все зависит от требований, предъявляемых к условиям измерений, и свойств самого исследуемого диэлектрика.

Ставилась задача экспериментального определения диэлектрической проницаемости композиционных материалов (порошкообразных, волокнистых и пр.), в том числе включающих жидкую фазу, в широком диапазоне частот СВЧ. Исходя из требований, предъявляемых к измерениям, наиболее подходящими являются методы, основанные на измерении S -параметров линии, содержащей диэлектрик.

Метод линии передачи [2] широко используется для определения диэлектрической проницаемости в СВЧ-диапазоне и заключается в измерении S -параметров измерительной линии, содержащей исследуемый образец. По измеренным параметрам коэффициентов отражения/передачи судят о величине ϵ . Кроме того, с помощью этого метода можно измерять S -параметры образца при падении на него волны с разной ориентацией вектора \mathbf{E} . При проведении измерений S -параметров требуется большая точность, использование специальных приборов и устройств, их калибровка, а для определения диэлектрических характеристик необходимо применение численных либо графических методов.

Для измерения жидких и твердых диэлектриков была использована коаксиальная измерительная ячейка (рис. 1), включающая внешний и внутренний проводники и шайбу, служащую нижней границей объема при измерении характеристик жидких диэлектриков.

Шайба выполнена из радиопрозрачного материала с низкой диэлектрической проницаемостью, чтобы вносить наименьшие искажения в измеряемый сигнал. Толщина шайбы и расстояние ее установки от краев измерительной ячейки фиксированы для минимизации влияния факторов положения образца на результаты измерений.

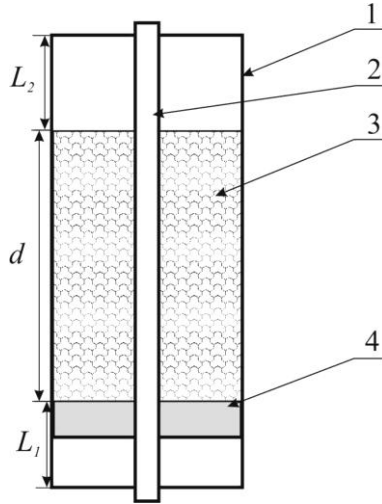


Рис. 1. Схема измерительной ячейки с образцом исследуемого материала: 1 — внешний проводник, 2 — внутренний проводник коаксиальной измерительной ячейки, 3 — исследуемый диэлектрический материал, 4 — держатель из материала с низкой диэлектрической проницаемостью, L_1 , L_2 — расстояния от плоскостей отсчета до образца, d — толщина образца

Определение S-параметров линии, содержащей исследуемый образец, основывается на следующих соотношениях [3]:

$$S_{11}^{ch} = R_1^2 \frac{\Gamma(1-z^2)}{1-\Gamma^2 z^2}, \quad S_{11}^{kz} = R_1^2 \frac{-2\beta\delta + (\delta+1 + (\delta-1)\beta^2) \tanh(\gamma d)}{2\beta + (\delta+1 + (\delta-1)\beta^2) \tanh(\gamma d)},$$

$$S_{21} = R_1 R_2 \frac{z(1-\Gamma^2)}{1-\Gamma^2 z^2}, \quad R_1 = e^{-\gamma_0 L_1}, \quad R_2 = e^{-\gamma_0 L_2}, \quad \beta = \gamma/\gamma_0,$$

$$\gamma = j\sqrt{\omega^2 \epsilon/c^2 - (2\pi/\lambda_{кр})^2}, \quad \gamma_0 = j\sqrt{\omega^2/c^2 - (2\pi/\lambda_{кр})^2},$$

$$\delta = e^{-2\gamma_0 L_2}, \quad \Gamma = \frac{\gamma_0 - \gamma}{\gamma_0 + \gamma}, \quad z = e^{-\gamma d},$$

где S_{11}^{kz} и S_{11}^{ch} — коэффициенты отражения линии в режиме короткого замыкания и согласованной нагрузки; S_{21} — коэффициент передачи; ω — циклическая частота зондирующего электромагнитного поля; ϵ — комплексная диэлектрическая проницаемость материала; c — скорость света; λ — длина волны в волноводе; $\lambda_{кр}$ — длина волны, соответствующая критической частоте.

Результаты измерений

Влажность имеет большое влияние на диэлектрические характеристики электротехнических материалов в диапазоне СВЧ. Поскольку вода является полярным диэлектриком, потери которого резко возрастают в диапазоне частот свыше сотен мегагерц, повышение влажности материалов приводит к изменению их диэлектрических свойств. Особенно это важно для пористых материалов, с большой удельной площадью поверхности, например, порошкообразных или волокнистых.

Одним из высокопористых порошкообразных материалов является силикагель. Исследовался комплексный коэффициент передачи коаксиальной измерительной ячейки, заполненной порошкообразным силикагелем с размером фракций 10...100 мкм (рис. 2) в диапазоне частот 0,3...3 ГГц с использованием векторного анализатора цепей.

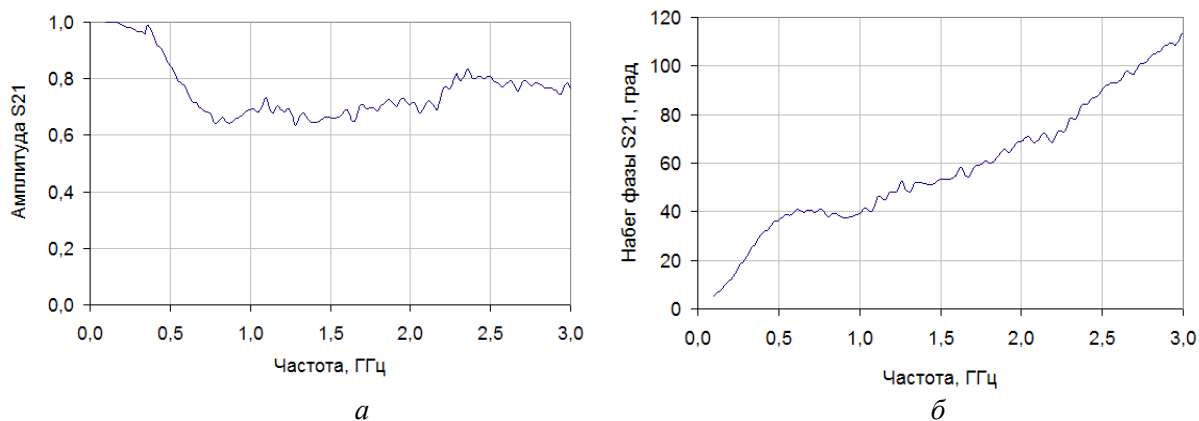


Рис. 2. Характеристики амплитуды (а) и сдвига фазы (б) коэффициента передачи измерительной ячейки, заполненной порошкообразным мелкофракционным силикагелевым материалом

Равновесное влагосодержание силикагеля при нормальных условиях составляет до 30 %. Это приводит к снижению коэффициента передачи линии, содержащей измеряемый материал до 0,65...0,95 на разных частотах, со снижением коэффициента передачи и линейной характеристикой набега фазы при возрастании частоты, что согласуется с представлениями о характере действительной и мнимой частях диэлектрической проницаемости воды на этих частотах. Предметом моделирования должны являться диэлектрические свойства порошкообразных материалов с различной степенью влагосодержания, в зависимости от фракционного состава, физико-химических свойств и структуры.

MICROWAVE MEASURING OF COMPOSITE MATERIAL DIELECTRIC PERMITTIVITY

K.V. NIKITENKO, T.A. PULKO, N.V. KOLBUN

Abstract

Values of real and imaginary parts of dielectric permittivity in a wide frequency band are of great importance for electrotechnical materials. The permittivity of composite and heterogeneous materials is a function of multiple parameters such as chemical composition, structure, moisture etc. Thus, modeling of dielectric properties of such media is rather complicated and usually the permittivity is obtained through experimental indirect measurements.

Литература

1. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М., 1982.
2. Моделирование процессов термовлагопереноса в капиллярно-пористых средах / С.П. Кундас и др. Минск, 2007.
3. Baker-Jarvis J., Vanzura E.J., Kissick W.A. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 38, No. 8. P. 1096–1103.