

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.6>

УДК 621.315.61

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Д. Г. Фомин, Н. В. Дударев, С. Н. Даровских

Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
Россия, 454080 Челябинск, проспект Ленина, 76

Статья поступила в редакцию 2 июня 2021 г.

Аннотация. *Введение.* Одной из современных тенденций развития систем связи, информационно-телекоммуникационных систем, систем управления воздушным движением и др. является переход и освоение более высокочастотных диапазонов длин волн. В этой связи, все более жесткие требования (по спектру, по внеполосному и побочному радиоизлучению, по форме выходного сигнала) предъявляются к радиотехническим устройствам, работающим на передачу и прием СВЧ радиосигналов. Как следствие, возрастают требования к конструктивным и функциональным особенностям СВЧ электронных устройств. Одним из таких требований является оценка степени соответствия требуемым значениям диэлектрических свойств материалов, используемых в конструкциях СВЧ электронных устройств. Данное требование обосновано тем, что электрические параметры таких СВЧ устройств как: полосковые фильтры, делители мощности, печатные антенны и другие, напрямую зависят от диэлектрических свойств материалов, используемых в их конструкциях подложек. В связи с этим в настоящее время возникло три основных метода оценки диэлектрических свойств материалов: резонансный метод, нерезонансный метод и метод свободного пространства. *Цель исследования.* Целью данной работы является проведение сравнительного анализа известных методов измерения диэлектрических свойств материалов в СВЧ диапазоне длин волн и устройств их реализации. *Материалы и методы.* Авторами работы проведен обзор научной литературы отечественного и

зарубежного изданий. *Результаты.* Для каждого из методов измерения диэлектрических свойств материалов приведены их основная идея, практическая реализация, математическая модель обработки экспериментальных данных, области применения, а также достоинства и недостатки. *Заключение.* Применимость каждого из рассмотренных методов зависит от таких факторов как: форма исследуемого диэлектрического материала, его агрегатное состояние, возможность измерения амплитудных или комплексных коэффициентов передачи и отражения, наличие безэховой камеры и др.

Ключевые слова: диэлектрические свойства материалов, резонансные методы, нерезонансные методы, метод свободного пространства.

Abstract. One of the modern trends in the development of communication systems, information and telecommunication systems, air traffic control systems, etc. is the transition and development of higher-frequency wavelength ranges. In this regard more and more stringent requirements (in terms of spectrum, out-of-band and spurious radio emission, and in the shape of the output signal) are imposed on radio engineering devices that transmit and receive microwave radio signals. As a result, the requirements for the design and functional features of microwave electronic devices are increasing. One of these requirements is to assess the degree of compliance with the required values of dielectric properties of materials used in the design of microwave electronic devices. This requirement is justified by the fact that the electrical parameters of such microwave devices as: strip filters, power dividers, printed antennas and others, directly depend on the dielectric properties of the materials used in their substrate designs. In this regard, three main methods have now emerged for assessing the dielectric properties of materials: the resonant method, the non-resonant method, and the free space method. *Aim.* The aim of this article is to carry out a comparative analysis of the known methods for measuring the dielectric properties of materials in the microwave range of wavelengths and devices for their implementation. *Materials and methods.* The authors of the article reviewed the scientific literature of domestic and foreign publications. *Results.* For each of the

methods for measuring the dielectric properties of materials, their main idea, practical implementation, a mathematical model for processing experimental data and areas of application are given. The advantages and disadvantages for each of the methods for measuring the dielectric properties of materials are given too. *Conclusion.* The applicability of each of the considered methods depends on such factors as: the shape of the investigated dielectric material, its state of aggregation, the possibility of measuring amplitude or complex transmission and reflection coefficients, the presence of an anechoic chamber, etc.

Key words: dielectric properties of materials, resonance methods, non-resonant methods, free space method.

Введение

Одной из современных тенденций развития систем связи, управления воздушным движением и др. является переход и освоение более высокочастотных диапазонов [1]. В этой связи, все более жесткие требования (по спектру, по внеполосному и побочному радиоизлучению, по форме выходного сигнала) предъявляются радиотехническим устройствам, работающим на передачу и прием СВЧ радиосигналов. Как следствие, повышаются требования к контролю параметров используемых в СВЧ электронике диэлектрических материалов: подложек для устройств, реализованных по микрополосковой технологии; обтекателей антенн и др. В настоящее время известны три основных метода измерения диэлектрических свойств материалов в СВЧ диапазоне частот: 1) Резонансный метод; 2) Нерезонансный метод; 3) Метод свободного пространства. Основной проблемой их использования является отсутствие в научной литературе информации о сравнительной оценке их применимости. Целью данной работы является проведение сравнительного анализа известных методов измерения диэлектрических свойств материалов в СВЧ диапазоне длин волн и устройств их реализации.

1. Диэлектрические свойства материалов и методы их измерения

1.1. Диэлектрические свойства материалов

Диэлектрические свойства материалов в математическом представлении – это комплексное число, описывающее взаимодействие материала с электрическим полем [2].

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'', \quad (1)$$

$$\varepsilon' = \varepsilon_r \varepsilon_0, \quad (2)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta, \quad (3)$$

где ε' – реальная часть диэлектрической проницаемости, ε'' – мнимая часть диэлектрической проницаемости (коэффициент диэлектрических потерь), ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная, δ – угол диэлектрических потерь.

Так реальная часть диэлектрической проницаемости ε' определяет количество запасенной энергии внешнего электрического поля в материале. Мнимая часть диэлектрической проницаемости ε'' определяет долю потерь относительно внешнего электрического поля. Тангенс угла диэлектрических потерь определяет отношение энергии потерь в материале к энергии, запасенной в материале.

$$\operatorname{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' = \frac{\text{Энергия потерь}}{\text{Энергия запасенная}} \quad (4)$$

Приведенные в соотношениях (1-4) физические величины (ε' , ε'') являются функциями частоты. Основная идея представленных ниже методов – определение диэлектрической проницаемости материалов в широком диапазоне частот.

1.2. Резонансный метод

Основная идея метода заключается в измерении частоты смещения электрического резонанса коэффициента отражения при помещении внутрь резонатора образца исследуемого материала. Для проведения измерений используются векторные или скалярные анализаторы цепей. Одним из наиболее

популярных типов резонаторов являются волноводные резонаторы прямоугольного сечения (Рис. 1).

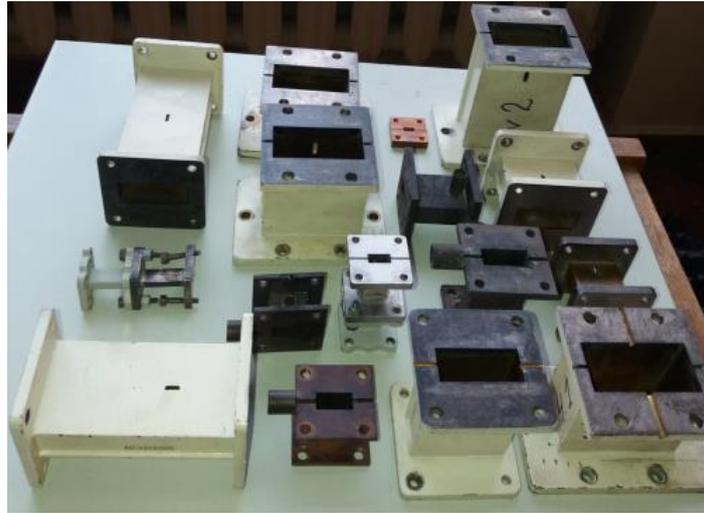


Рис. 1. Волноводные резонаторы прямоугольного сечения [3].

Ниже приведены основные соотношения, необходимые для определения диэлектрических свойств материалов по результатам измерений при использовании скалярного анализатора цепей [3]:

$$\varepsilon' = 1 + \frac{f_0 - f_1}{f_1} \frac{V}{2\Delta V}, \quad (5)$$

$$\varepsilon'' = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g} \right)^2 \frac{\eta[(КСВ)_1 - (КСВ)_0]}{2\pi n} \frac{V}{4\Delta V}, \quad (6)$$

где f_0 и f_1 – резонансные частоты без образца исследуемого материала и с образцом соответственно, λ_0 и λ_g – резонансные длины волны в свободном пространстве и в волноводе соответственно, V и ΔV – объемы резонатора и образца соответственно, η – коэффициент связи через диафрагму (по мощности), n – число полуволн, укладываемых по длине резонатора, $(КСВ)_0$ и $(КСВ)_1$ – коэффициенты стоячей волны на резонансных частотах без образца и с образцом соответственно [3].

При определении реальной части диэлектрической проницаемости ε' основными измеряемыми параметрами являются резонансные частоты f_0 и f_1 . При определении мнимой части диэлектрической проницаемости ε''

основными измеряемыми параметрами являются коэффициенты стоячей волны на резонансных частотах $(КСВ)_0$ и $(КСВ)_1$.

Достоинства резонансного метода: 1) при измерениях требуется небольшое количество измеряемого материала; 2) нет необходимости измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения, достаточно знать лишь амплитудные значения коэффициента отражения; 3) взамен дорогостоящего векторного анализатора цепей может быть использован более дешевый скалярный анализатор.

Недостатки резонансного метода: 1) требуется несколько образцов волноводных резонаторов с разной собственной частотой резонанса для измерения исследуемого образца материала в широком диапазоне частот; 2) высокие требования к точности изготовления волноводных резонаторов; 3) искажения частотной зависимости коэффициента отражения из-за паразитных отражений и переотражений в волноводном тракте.

1.3. Нерезонансный метод

Основная идея метода заключается в измерении комплексных коэффициентов передачи (S_{21}) и отражения (S_{11}) при прохождении тестового сигнала через закрытую линию передачи (Рис. 2) без образца исследуемого материала и с образцом [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Для проведения измерений используются векторные анализаторы цепей (ВАЦ). Математическая обработка результатов осуществляется методом Николсона-Росса-Вейера [4].

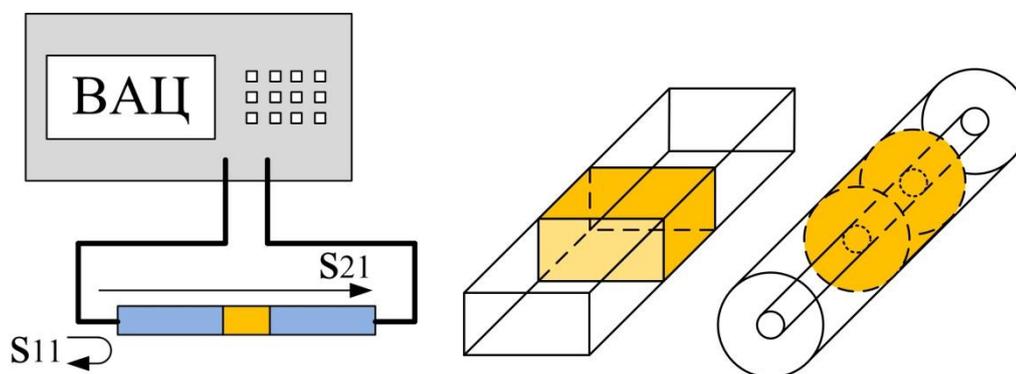


Рис. 2. а) Измерительная установка; б) Закрытые линии передачи: 1) Волноводная линия передачи 2) Коаксиальная линия передачи.

Ниже приведены основные соотношения, используемые в математической модели Николсона-Росса-Вейера для материала толщиной d , установленного в воздушную коаксиальную линию (Рис. 3).

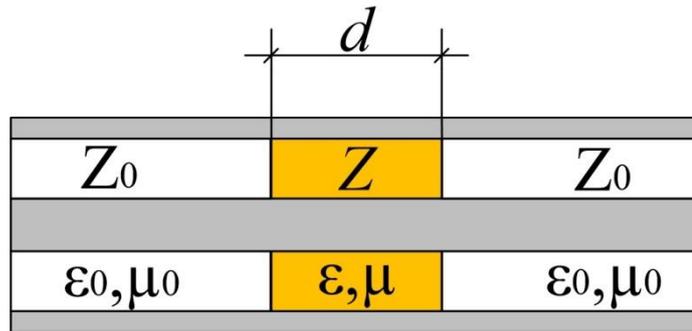


Рис. 3. Воздушная коаксиальная линия с размещенным образцом исследуемого материала.

Для тестового СВЧ сигнала электрическая длина исследуемого образца материала z определяется согласно соотношению:

$$z = \exp\left[-\frac{j\omega d}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r}\right], \quad (7)$$

где ω – круговая частота, рад/с, c – скорость света в вакууме, м/с, d – толщина материала, м, μ_r – относительная магнитная проницаемость, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость.

Коэффициент отражения Γ от исследуемого материала (при $d \rightarrow \infty$) для СВЧ сигнала, распространяющегося от источника, определяется согласно соотношению:

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = \frac{\sqrt{\mu_r/\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\mu_r/\epsilon_r} + 1}, \quad (8)$$

где Z – волновое сопротивление коаксиальной линии, заполненной исследуемым материалом, Z_0 – волновое сопротивление коаксиальной линии с воздушным заполнением.

Частотно-зависимые комплексные коэффициенты передачи (S_{21}) и отражения (S_{11}) определяются следующими соотношениями:

$$S_{21}(\omega) = \frac{(1 - \Gamma^2)z}{1 - \Gamma^2 z^2} \quad (9)$$

$$S_{11}(\omega) = \frac{(1-z^2)\Gamma}{1-\Gamma^2 z^2} \quad (10)$$

Представим сумму и разность коэффициентов матрицы рассеяния следующим образом:

$$V_1 = S_{21} + S_{11} \quad (11)$$

$$V_2 = S_{21} - S_{11} \quad (12)$$

Введем коэффициент X :

$$X = \frac{1-V_1V_2}{V_1-V_2} \quad (13)$$

Коэффициент отражения Γ и электрическая длина исследуемого образца материала z определяются как:

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1} \quad (14)$$

$$z = \frac{V_1 - \Gamma}{1 - V_1\Gamma} \quad (15)$$

Соответствующий знак выбирается из условия $|\Gamma| \leq 1$.

Выполнив математические преобразования соотношений (7-15) получаем следующие:

$$\frac{\mu_r}{\varepsilon_r} = \left(\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \right)^2 = c_1 \quad (16)$$

$$\mu_r \varepsilon_r = - \left\{ \frac{c}{\omega d} \ln \left(\frac{1}{z} \right) \right\}^2 = c_2 \quad (17)$$

$$\mu_r = \sqrt{c_1 c_2} \quad (18)$$

$$\varepsilon_r = \sqrt{\frac{c_2}{c_1}} \quad (19)$$

Так, воспользовавшись выражениями (11-19) можем определить комплексные значения относительной диэлектрической ε_r и магнитной μ_r проницаемостей. Отметим, что комплексные коэффициенты передачи (S_{21}) и отражения (S_{11}) могут быть получены только при использовании векторного

анализатора цепей.

Достоинства нерезонансного метода: 1) при измерениях требуется небольшое количество материала; 2) не требуется большого количества образцов измерительных устройств; 3) измерение в широком диапазоне частот.

Недостатки нерезонансного метода: 1) предъявляются высокие требования с точности изготовления образцов измеряемых материалов; 2) образец должен быть изотропный и однородный; 3) требуется дорогостоящее оборудование – векторный анализатор цепей; 4) высокие требования к точности изготовления закрытых линий передачи; 5) высокие требования к точности измерения фазы и амплитуды коэффициентов передачи и отражения.

1.4. Метод свободного пространства

Метод свободного пространства оптимален для неразрушающего контроля листовых материалов большой площади [3] (Рис. 4). Основная идея метода заключается в измерении комплексных коэффициентов передачи (S_{21}) и отражения (S_{11}) при прохождении тестового сигнала, излучаемого антеннами через исследуемый листовый материал [13, 14, 15].

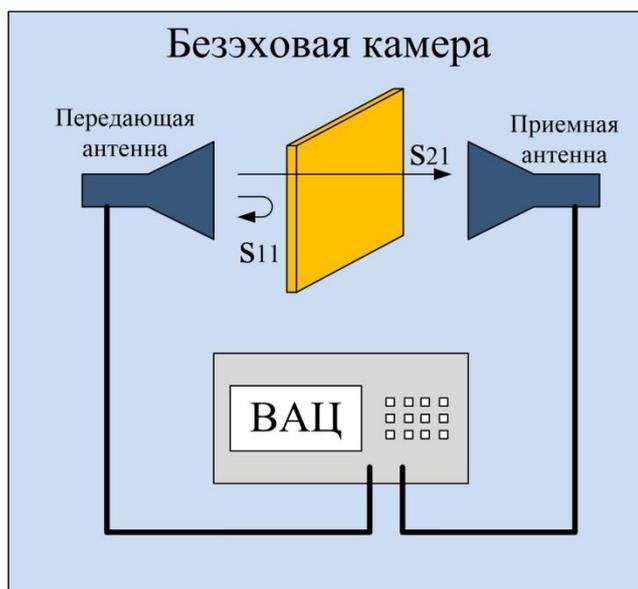


Рис. 4. Метод свободного пространства.

Достоинства метода свободного пространства: 1) оптимален для неразрушающего контроля листовых материалов большой площади; 2)

позволяет проводить измерения в условиях высоких температур; 3) не требуется большого количества образцов измерительных устройств; 4) поляризация антенн может варьироваться для анизотропных материалов; 5) измерения в широком диапазоне частот.

Недостатки метода свободного пространства: 1) требуется дорогостоящее оборудование – векторный анализатор цепей; 2) требуется безэховая камера; 3) высокие требования к точности измерения фазы и амплитуды коэффициентов передачи и отражения; 4) необходим контроль параметров антенн.

Заключение

В работе представлен сравнительный анализ основных методов измерения диэлектрических свойств материалов. Рассмотрены такие методы как: 1) резонансный метод, 2) нерезонансный метод, 3) метод свободного пространства. Для каждого из методов приведены его достоинства и недостатки. Применимость каждого из методов зависит от таких факторов как: форма исследуемого диэлектрического материала, его агрегатное состояние, возможность измерения амплитудных или комплексных коэффициентов передачи и отражения, наличие безэховой камеры и др.

Результаты проведенного анализа позволяют экспериментаторам исследований электродинамических свойств материалов в СВЧ диапазоне длин волн выбрать наиболее приемлемый для них метод измерения.

Литература

1. *Таблица распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации (статистические данные)* [Электронный ресурс]. 01.06.2021. URL: <https://digital.gov.ru/opendata/7710474375-trpch/table/>
2. Mandrić V.R., Rupčić S., Srnović M., Benšić G. Measuring the dielectric constant of paper using a parallel plate capacitor. *International journal of electrical and computer engineering systems*. 2018. Vol.9. P.1-10. <http://dx.doi.org/10.32985/ijeces.9.1.1>

3. Дьяконова О. А., Казанцев Ю. Н., Каленов Д.С. Измерительный комплекс для определения электромагнитных характеристик материалов резонаторным методом с помощью скалярных анализаторов цепей. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2017. №7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul17/7/text.pdf>
4. Nicolson A.M., Ross G.F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time domain techniques. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1970. No.4. P.377-382. <https://doi.org/10.1109/TIM.1970.4313932>
5. Sahin S., Nahar N.K., Sertel K. Simplified Nicolson-Ross-Weir Method for Material Characterization Using Single-Port Measurements. *IEEE Trans. On terahertz science and technology.* 2020. Vol.10. No.4. P.404-410. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2020.2980442>
6. Luukkonen O., Maslovski S.I., Tretyakov S.A. Stepwise Nicolson-Ross-Weir-Based Material Parameter Extraction Method. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2011. No.10. P.1295-1298. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2011.2175897>
7. Rothwell E. J., Frasca J. L., Ellison S. M., Chahal P., Ouedraogo R. O. Analysis of the Nicolson-Ross-Weir Method for Characterizing the Electromagnetic Properties of Engineered Materials. *Progress In Electromagnetics Research.* 2016. No.157. P.31-47. <http://dx.doi.org/10.2528/PIER16071706>
8. Severo S.L.S., de Salles A.A.A., Nervis B., Zanini B. K. Non-resonant Permittivity Measurement Methods. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications.* 2017. No.1. P.297-311. <https://doi.org/10.1590/2179-10742017v16i1890>
9. Weir W.B. Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies. *Proceedings of the IEEE.* 1974. No.1. P.3-36. <https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9382>
10. Klygach D., Vakhitov M., Khashimov A., Zhivulin V., Vinnik D., Sherstyuk D. Determination of the Optimal Sample Size for Measurement in a Coaxial Transmission Line. *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics*

- and Information Technology (USBREIT)*. 2020. P.322-325.
<https://doi.org/10.1109/USBREIT48449.2020.9117619>
11. Agilent. *Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials. Application Note*. [Электронный ресурс]. 01.06.2021. URL:
http://academy.cba.mit.edu/classes/input_devices/meas.pdf
12. Keysight Technologies. *Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials. Application Note*. [Электронный ресурс]. 01.06.2021. URL:
https://www.cmc.ca/wp-content/uploads/2019/08/Basics_Of_MeasuringDielectrics_5989-2589EN.pdf
13. Беляев А.А., Романов А.М., Широков В.В., Шульдешов Е.М. Измерение диэлектрической проницаемости стеклосотопласта в свободном пространстве. *Труды ВИАМ*. 2014. №5. С.1-16.
14. Певнева Н.А., Гурский А.Л., Кострикин А.М. Метод свободного пространства с использованием векторного анализатора цепей для определения диэлектрической проницаемости материалов на сверхвысоких частотах. *Доклады БГУИР*. 2019. №4. С.32-39.
15. Gonçalves F.J.F., Pinto A.G. M., Mesquita R.C., Silva E.J., Brancaccio A. Free-Space Materials Characterization by Reflection and Transmission Measurements using Frequency-by-Frequency and Multi-Frequency Algorithms. *Electronics*. 2018. No.7. P.1-21. <https://doi.org/10.3390/electronics7100260>

Для цитирования:

Фомин Д.Г., Дударев Н.В., Даровских С.Н. Анализ методов измерения диэлектрических свойств материалов в СВЧ диапазоне длин волн. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.6>