

М.М. Мигалин, В.А. Обуховец**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОЛЬГИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ
С ПОМОЩЬЮ ПЕЧАТНЫХ СТРУКТУР**

Рост требований пользователей к скорости обмена данными в телекоммуникационных системах привел к активному освоению мм-диапазона длин и интенсивному развитию широкополосных систем связи. Проектирование устройств СВЧ мм-диапазона волн с помощью САПР требует точного описания частотной зависимости диэлектрической проницаемости используемой подложки для сокращения времени разработки устройства. Целью данной статьи является определение относительной диэлектрической проницаемости фольгированного диэлектрика Rogers 3003G2 в мм-диапазоне длин волн. Для нахождения диэлектрической проницаемости был использован как нерезонансный, так и резонансный методы. Автоматизации процесса обработки данных измерений была достигнута с помощью разработанного скрипта в пакете MATLAB. Применяя метод разности фаз, заключающийся в применении двух микрополосковых линий разной длины, была определена относительная диэлектрическая проницаемость фольгированного диэлектрика в полосе 1–42 ГГц. Для отказа от использования зондовой станции с хрупкими зондами для измерений S-параметров в мм-диапазоне длин были разработаны SIW-резонаторы с волноводным возбуждением. Применяв три прототипа многомодовых SIW-резонаторов, была найдена относительная диэлектрическая проницаемость исследуемого диэлектрика в диапазоне 60–170 ГГц. Во избежание неоднозначности при определении номера продольной моды в SIW-резонаторах был разработан набор одномодовых SIW – резонаторов с различной величиной связи с возбуждающим волноводом. Варьируя длину возбуждающих щелей в SIW – резонаторах, были получены нагруженные резонансные частоты, по которым была определена ненагруженная резонансная частота, использованная для нахождения относительной диэлектрической проницаемости фольгированного диэлектрика. В заключении работы даны рекомендации по разработке SIW-резонаторов для определения свойств диэлектриков.

Относительная диэлектрическая проницаемость; SIW-резонаторы; ненагруженная резонансная частота.

M.M. Migalin, V.A. Obukhovets**PCB SUBSTRATES CHARACTERISATION USING PRINTED STRUCTURES**

Growing user requirements for data exchange rates in telecommunication systems have resulted in the active adoption of mm-band wavelengths and the intensive development of broadband communication systems. Designing mm-wave microwave devices using CAD requires accurate frequency-dependent relative permittivity data for the used substrate to reduce the device design time. This paper focuses on determining the relative dielectric constant of the Rogers 3003G2 substrate in the mm-wavelength range. Both non-resonant and resonant methods were used to find the dielectric permittivity. The automation of the measurement data processing was achieved by using the developed script in MATLAB. The relative permittivity of the substrate in the band 1-42 GHz was determined by applying the phase difference method, using two microstrip lines of different lengths. SIW resonators with waveguide excitation were developed to avoid using a probe station with fragile probes for S-parameter measurements in the mm-length range. The relative permittivity of the studied substrate in the 60-170 GHz range was found using three prototype multi-mode SIW resonators. A set of single-mode SIW resonators with different waveguide excitation coupling was produced to avoid ambiguity in longitudinal mode number determination in multi-mode SIW resonators. Several loaded resonant frequencies were obtained by varying the length of SIW-resonators' excitation slots to calculate the unloaded resonant frequency used to find the relative dielectric permittivity of the substrate. Recommendations for developing SIW resonators for the determination of dielectric properties of the substrates are given in the conclusion section.

Relative dielectric permittivity; SIW – resonators; unloaded resonant frequency.

Введение. Определение диэлектрических свойств материалов играет важную роль в промышленности и в сельском хозяйстве. По данным о комплексной диэлектрической проницаемости возможно определение объемных долей жидкостей и твердых частиц [1, 2], выявление загрязняющих веществ в почве [3], разработка устройств накопления энергии [4]. Точные значения диэлектрической проницаемости на разных частотах игра-

ют особую роль при проектировании техники СВЧ. При известных параметрах диэлектрика возможно моделирование СВЧ – устройств в САПР, что существенно сокращает их время разработки. Развитие систем связи 5G и 6G повысило требования к фольгированным диэлектрикам, что привело к появлению как новых материалов [5], так и новых подходов к измерению диэлектрической проницаемости СВЧ – материалов [6–7].

Обзор методов измерения диэлектрической проницаемости. Все методы определения диэлектрической проницаемости в частотной области можно разделить на две группы: резонансные и нерезонансные [8]. Резонансные методы обладают высокой точностью, зачастую применяются для работы с диэлектриками, обладающими низкими потерями, но позволяют определять свойства диэлектрика в узкой полосе частот, в то время как нерезонансные методы позволяют измерить диэлектрическую проницаемость в широком частотном диапазоне, но их точность ниже.

Резонансные методы. Данная группа методов основана либо на измерении резонансной частоты резонатора при наличии и отсутствии измеряемого материала, либо на определении собственной частоты резонатора, заполненного исследуемым материалом. В качестве объемных резонаторов могут выступать различные конфигурации цилиндрических резонаторов [9–11], верхняя рабочая частота которых ограничена размерами фидерных систем. К этой группе относятся и открытые резонаторы Фабри – Перо [12], диэлектрические резонаторы [13], коаксиальные резонаторы [14] и класс печатных резонаторов [15], в котором можно выделить одномодовые и многомодовые SIW – резонаторы [16] и кольцевые резонаторы [17], применяемые в мм-диапазоне длин волн.

Нерезонансные методы. Методы этой группы используют изменение фазовой скорости в линии передачи, заполненной полностью или частично исследуемым диэлектриком. Выделяют отражательные методы и методы, основанные на прохождении электромагнитного поля (ЭМП) через исследуемый образец. Для применения одного из методов прохождения, необходимо разместить анализируемый материал между двумя источниками ЭМП. Диэлектрик может быть расположен между антеннами [18], внутри волновода [19] или выступать в качестве подложки для микрополосковой линии (МПЛ) [20]. Отражательные методы используют отрезки линии передач, нагруженные на исследуемый материал. Распространение получили коаксиальные и волноводные линии передач для оценки свойств диэлектрика [21]. В качестве альтернативы закрытым направляющим системам выступают моностатический и бистатический методы в открытом пространстве [8].

В настоящее время печатные резонаторы получили широкое распространение из-за возможности определения эффективной относительной диэлектрической проницаемости («effective dielectric constant»), которая учитывает топологию печатной платы и шероховатость меди [22]. Мномодовые SIW – резонаторы позволяют определить относительную диэлектрическую проницаемость в широкой полосе частот с высокой точностью, но для их применения требуется начальное приближение для величины относительной диэлектрической проницаемости [23], что ограничивает применимость этого метода. В работе [23] также не описано влияния возбуждающей щели, выступающей в роли нагрузки, на смещение резонансных частот. Кольцевые резонаторы тоже позволяют определить параметры диэлектрика в широкой полосе частот, но в мм-диапазоне такие измерения требуют применения зондовых установок, а без учета излучения возбуждающих щелей снижается точность определения тангенса диэлектрических потерь [17].

2. Сравнительный анализ методов определения относительной диэлектрической проницаемости. В настоящей статье рассматривается применение набора печатных структур, для определения относительной диэлектрической проницаемости фольгированного диэлектрика RO3003G2 в диапазоне 1–170 ГГц.

2.1. Метод разности фаз. Данный метод заключается в определении эффективной диэлектрической проницаемости по результатам измерений фазового набега в двух МПЛ разной длины, расположенных на одинаковой подложке. Этот метод был рассмотрен в [21] для определения относительной диэлектрической проницаемости фольгированного диэлектрика в диапазоне 1–4 ГГц с точностью 0,5–1%. Авторы работы показали, что точность метода возрастает с увеличением разницы физических длин МПЛ. В настоящей работе данный метод будет использован для получения начального приближения ε .

Пусть на диэлектрической подложке толщиной h , расположены две МПЛ шириной w с длинами l_1 и l_2 , согласованные с возбуждающим СВЧ – соединителем. Фазовый набег для каждой МПЛ может быть определен как:

$$\Phi_1 = \frac{2\pi}{c} f l_1 \sqrt{\varepsilon_{эфф}}, \Phi_2 = \frac{2\pi}{c} f l_2 \sqrt{\varepsilon_{эфф}}, \quad (1)$$

где f – частота, $\varepsilon_{эфф}$ – относительная эффективная диэлектрическая проницаемость, c – скорость света в вакууме. Зная длины МПЛ, можно определить относительную эффективную диэлектрическую проницаемость:

$$\varepsilon_{эфф}(f) = \left(\frac{c(\Phi_1 - \Phi_2)}{2\pi f(l_1 - l_2)} \right)^2. \quad (2)$$

Для определения характеристик фольгированного диэлектрика Rogers 3003G2 были изготовлены две МПЛ с разницей длин 29 мм. Коэффициент передачи S_{21} был определен с помощью откалиброванного векторного анализатора цепей (ВАЦ). Применяя выражения для вычисления относительной диэлектрической проницаемости по известной эффективной относительной диэлектрической проницаемости [24], представим значения ε в диапазоне 1–45 ГГц на рис. 1:

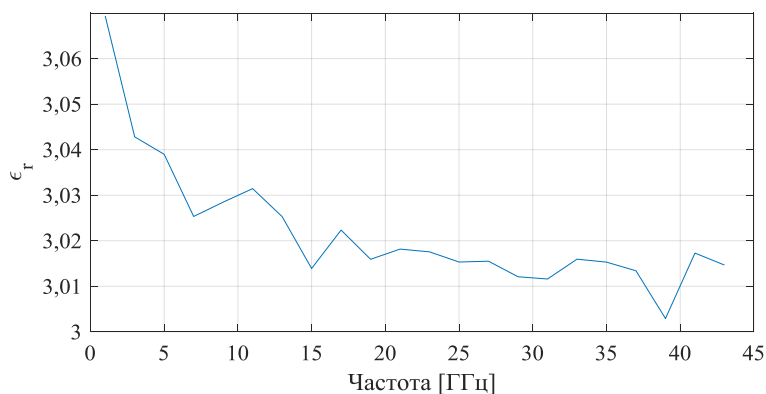


Рис. 1. Относительная диэлектрическая проницаемость Rogers 3003G2 в диапазоне 1–45 ГГц

Согласно технической документации Rogers [25], относительная диэлектрическая проницаемость ε на частоте 10 ГГц составляет $3 \pm 0,04$ что согласуется с результатом на рис. 1.

2.2. Многомодовые SIW-резонаторы. SIW-резонатор представляет собой неизлучающую СВЧ-структуру, которую можно возбуждать как щелью, так и с помощью МПЛ, как показано на рис. 2. Резонансная частота SIW-резонатора может быть определена как [23]:

$$f_U = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{w_{эфф}}\right)^2 + \left(\frac{n}{h_{эфф}}\right)^2 + \left(\frac{k}{l_{эфф}}\right)^2}, \quad (3)$$

где m, n, k – число вариаций поля по осям x, y и z , $w_{эфф}, h_{эфф}, l_{эфф}$ – эффективные значения ширины, высоты и длины эквивалентного прямоугольного волновода.

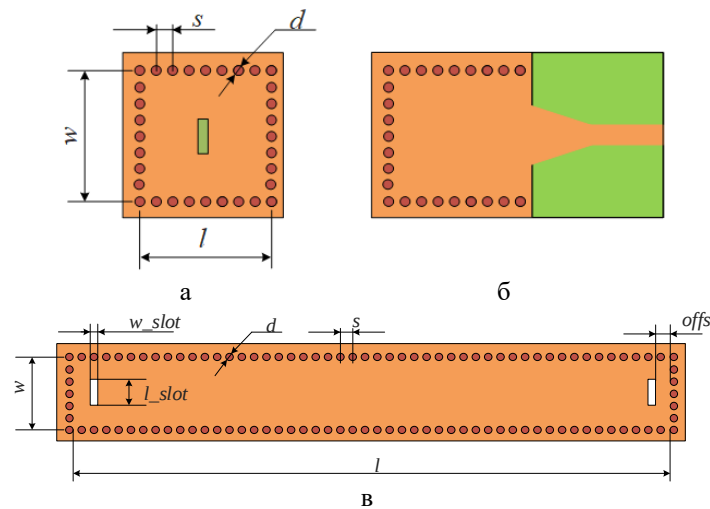


Рис. 2. SIW-резонаторы: а – волноводное возбуждение одномодового резонатора; б – микрополосковое возбуждение одномодового резонатора; в – волноводное возбуждение многомодового резонатора.

Согласно [26], размеры эквивалентного прямоугольного волновода могут быть определены как:

$$w_{eff} = w \cdot \left(\xi_1 + \frac{\xi_2}{\frac{s}{d} + \frac{\xi_1 + \xi_2 - \xi_3}{\xi_3 - \xi_1}} \right), \quad (4)$$

$$\xi_1 = 1,0198 + \frac{0,3465}{\frac{w}{s} - 1,0684}, \quad \xi_2 = -0,1183 - \frac{1,2729}{\frac{w}{s} - 1,2010}, \quad \xi_3 = 1,0082 - \frac{0,9163}{\frac{w}{s} + 0,2152},$$

где d – диаметр металлизированного межслойного отверстия, s – расстояние между центрами близлежащих проходных отверстий, w , l , h – ширина, длина и высота SIW – резонатора.

С использованием значений $\mathcal{E}$, полученных методом разности фаз, были разработаны и изготовлены три многомодовых SIW-резонатора, резонансные частоты которых находятся в диапазоне 65–170 ГГц. В соответствии с технологическими возможностями производства и условием минимизации потерь на излучение через межслойные отверстия, расстояние между металлизированными переходными отверстиями s было принято равным 250 мкм, диаметр переходных отверстий $d = 150$ мкм, высота резонаторов $h = 0,127$ мм. Размеры и положение возбуждающих щелей были выбраны таким образом, чтобы минимизировать их влияние на резонансные пики. Макрофотография возбуждающей щели резонатора 75–110 ГГц приведена на рис. 3, а на рис. 4 представлено сравнение коэффициентов передачи, полученных в ходе моделирования в САПР CST Studio и в ходе измерений.

Был разработан скрипт в среде MATLAB, который автоматически определяет резонансные частоты, а по ним вычисляет значения $\mathcal{E}$. Агрегированные результаты работы скрипта для трех резонаторов представлены на рис. 5. Снижение величины $\mathcal{E}$ в диапазоне 85–110 ГГц, а затем её рост в диапазоне 110–170 ГГц может быть объяснен как отклонением геометрических размеров произведенных резонаторов от требуемых, так и неверным определением номера продольной моды k .

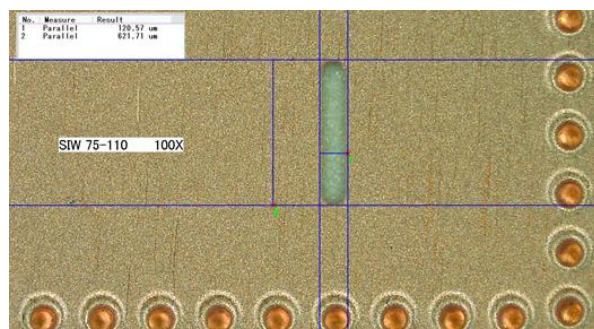


Рис. 3. Макрофотография возбуждающей щели SIW-резонатора диапазона 75–110 ГГц

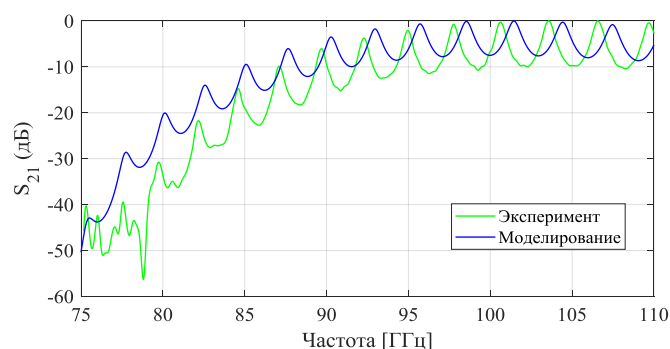


Рис. 4. Сравнение расчетного коэффициента передачи и экспериментально определенного для SIW-резонатора в полосе 75–110 ГГц

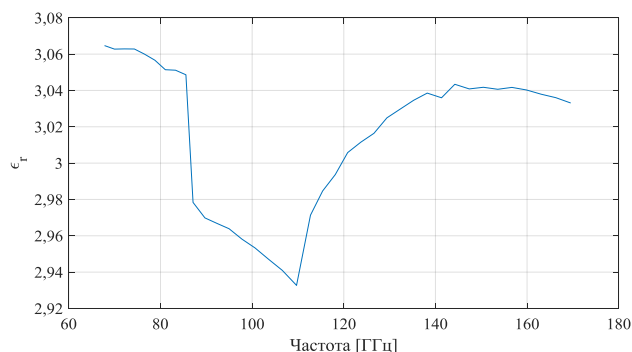


Рис. 5. Экспериментально определенное значение относительной диэлектрической проницаемости с помощью трех многомодовых SIW-резонаторов

2.3. Одномодовые SIW-резонаторы. Использование одномодовых резонаторов исключает неоднозначность при определении номера моды, требуемой для определения ϵ с помощью резонаторов, рассмотренных выше. При варьировании размеров возбуждающих щелей было замечено, что из-за связи между фидерной линией и резонатором резонансные частоты смещаются. Как показано в работе [27], связь между нагруженной f_L и ненагруженной f_U резонансными частотами может быть записана как:

$$f_L = f_U \cdot \left(1 + \frac{A}{Q_e^a}\right), \quad (5)$$

где Q_e – внешняя добротность, a и A – произвольные коэффициенты.

Необходимо решить систему из трех и более уравнений (5) для определения собственной резонансной частоты, так как внешняя добротность Q_e может быть определена исходя из диаметра резонансной окружности на диаграмме Вольперта-Смита по методике, описанной в [28]. Для получения набора нагруженных частот было предложено варьировать ширину возбуждающей щели, что приводит к изменению коэффициента связи с фидерной линией, а, следовательно, и к изменению резонансной частоты.

В качестве примера рассмотрим резонатор на подложке толщиной $h = 0,127$ мм, выполненной из материала RO3003G2 с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 3$. Пусть шаг межслойных металлизированных отверстий $s = 0,25$ мм, их диаметр $d = 0,15$ мм, а ширина резонатора $w = 4,2$ мм и длина $l = 4,3$ мм. Согласно результатам моделирования данного резонатора в САПР CST Studio методом собственных мод, резонансная частота такой структуры составит 29,56 ГГц. Результаты параметризации ширины возбуждающей щели представлены на рис. 6. Чем больше апертура возбуждающей щели, тем больше влияние питающего волновода на резонансные свойства SIW и тем ниже нагруженная резонансная частота.

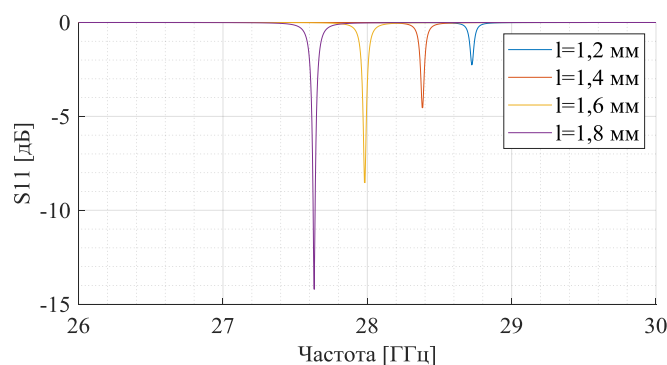


Рис. 6. Влияние ширины возбуждающей щели на коэффициент отражения S_{11}

Используя резонансные частоты, определим ненагруженную резонансную частоту применив выражение (5) и приведем рассчитанные значения на рис. 7.

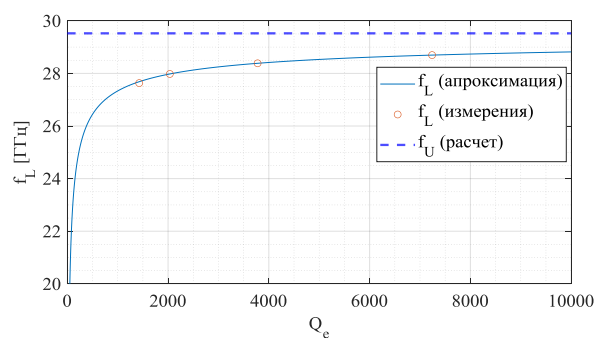


Рис. 7. Зависимость резонансной частоты от внешней добротности, $f_U = 29,52$ ГГц

Для определения относительной диэлектрической проницаемости были разработаны и изготовлены 36 пар резонаторов, покрывающие 12 частот с тремя разными по длине возбуждающими щелями. Изготовленные резонаторы изображены на рис. 8, а измерительная установка на рис. 9.

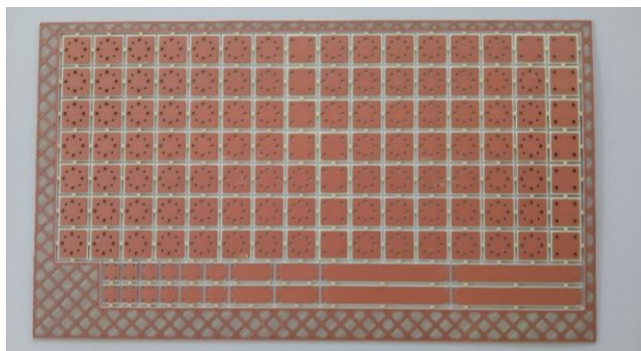


Рис. 8. Изготовленные SIW-резонаторы

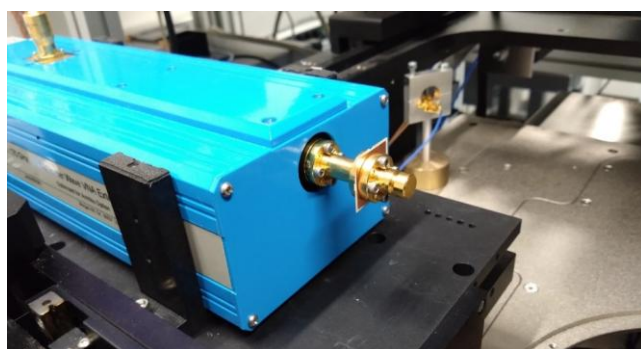


Рис. 9. Измерительный стенд: ВАЦ с частотным расширителем для измерения S_{11} одномодовых резонаторов

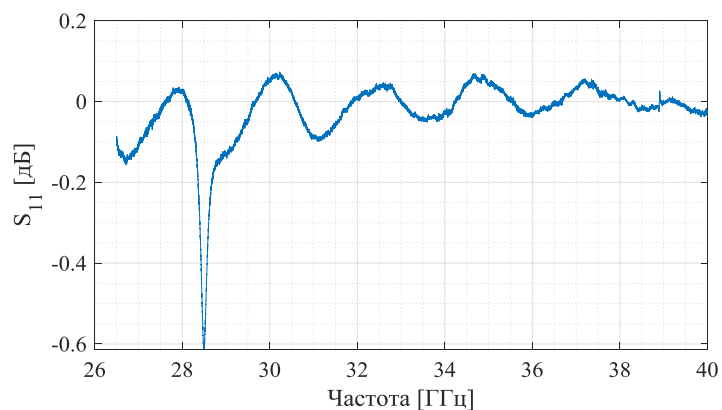


Рис. 10. Коэффициент отражения от входа резонатора с $f_L = 28,2$ ГГц

Из-за малой связи ВАЦ с резонаторами (рис. 10), методика, описанная в [28], применима только для отдельных прототипов, приведенных в таблице.

По полученным частотам f_U были определены значения относительной диэлектрической проницаемости, которые согласуются с результатами, полученными с помощью многомодовых резонаторов.

f_{eigen} (ГГц)	l_{slot} (мм)	Образец – 1		Образец – 2		f_U (ГГц)
		f_L (ГГц)	Q_e	f_L (ГГц)	Q_e	
129,55	0,3	130,92	2662	130,72	2980	133,32
	0,4	129,99	1063	129,33	1132	
	0,5	128,39	354	127,21	412,9	
	0,6	125,81	161,5	125,08	169	
140,407	0,3	140,89	6300	142,15	1940	140,899
	0,4	140,34	857,1	139,46	995	
	0,5	137,28	305,2	138,04	344,7	
149,96	0,3	150,46	1988	150,59	1616	152,556
	0,4	148,58	516	148,49	547	
	0,5	147	255	146,22	280	

Заключение. В работе было проведено исследование различных методов определения частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости подложки Rogers 3003G2. Неоднозначность номера продольной моды при определении относительной диэлектрической проницаемости была преодолена применением одномодовых SIW-резонаторов и расчетом начального значения диэлектрической проницаемости, полученного с помощью метода разности фаз. Преимущество данного подхода состоит в отсутствии необходимости использовать зондовую станцию для определения S-параметров резонаторов. Использование набора резонаторов с различной шириной возбуждающей щели позволяет определить ненагруженную резонансную частоту, с помощью которой возможно определение относительной диэлектрической проницаемости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wang C., Liu X., Huang Z., Yu S., et al. A Sensor for Characterisation of Liquid Materials with High Permittivity and High Dielectric Loss // *Sensors*. – 2022. – 22, 1764. – DOI: 10.3390/s22051764.
2. Shiheng H., Huang J. A Novel Substrate Integrated Waveguide Shorted Coaxial Resonator for Characterizing Complex Permittivity of Liquids and Solid Content of Water-based Ferrofluid // *IEEE Sensors Journal*. – 1 July, 2024. – Vol. 24, No. 13. – P. 20549-20558. – DOI: 10.1109/JSEN.2024.3399323.
3. Vergnano A., Godio A., Raffa CM., et al. Open-Ended Coaxial Probe Measurements of Complex Dielectric Permittivity in Diesel-Contaminated Soil during Bioremediation // *Sensors*. – 2020. – 20 (22):6677. – DOI: 10.3390/s20226677.
4. Zha J.W., et al. Polymer-based dielectrics with high permittivity for electric energy storage: A review // *Nano Energy*. – 2021. – 89. – 106438.
5. Takenori K., et al. Material design and high frequency characterization of novel ultra-low loss dielectric material for 5G and 6G applications // 2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC). – IEEE, 2021. – P. 538-543.
6. Krupka J., Pacewicz A., Kopyt P., Salski P. Measurements of the complex permittivity of low loss ferrites at millimeter wave frequencies // *Materials Research Bulletin*. – 2024. – Vol. 179. – P. 112994. – DOI: 10.1016/j.materresbull.2024.112994.
7. Mosavirik T., Hashemi M., Soleimani M., et al. Accuracy-Improved and Low-Cost Material Characterization Using Power Measurement and Artificial Neural Network // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – Vol. 70. – P. 1-9, 202. – DOI: 10.1109/TIM.2021.3126011.
8. Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P., Varadan V.V., Varadan V.K. Microwave electronics. Measurements and materials characterization. – John Wiley & Sons, 2004. – 552 p.
9. Белов Ю.Г., Кузнецова А.А., Нефедьев И.А. Цилиндрический резонатор для измерения параметров диэлектрических пластин // Информационные системы и технологии - 2019: Сб. материалов XXV Международной научно-технической конференции. – 2019. – С. 199-204.
10. Krupka J. Measurements of the Complex Permittivity of Low Loss Polymers at Frequency Range From 5 GHz to 50 GHz // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2016. – Vol. 26, No. 6. – P. 464-466.
11. Marqués-Villarroya D., et al. Enhanced Full-Wave Circuit Analysis for Modeling of a Split Cylinder Resonator // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2017. – Vol. 65, No. 4. – P. 1191-1202.

12. *Possenti L., et al.* Improved Fabry-Pérot electromagnetic material characterization: Application and results // *Radio Science*. – Nov. 2020. – Vol. 55, No. 11. – P. 1-15. – DOI 10.1029/2020RS007164.
13. *Naoki H., et al.* Measurement technique for interface and surface conductivities at millimeter-wave frequencies using dielectric rod resonator excited by nonradiative dielectric waveguide // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2022. – 70.5. – P. 2750-2761.
14. *Walia G., Laforge P. D., Azam S., Paranthaman R.* Dielectric Characterization Using Reflected Group Delay of a Partially Filled Coaxial Resonator // *IEEE Access*. – 2024. – Vol. 12. – P. 123581-123594. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3453658.
15. *Alahnomi R.A., Zakaria, Z., Yussof Z.M., et al.* Review of Recent Microwave Planar Resonator-Based Sensors: Techniques of Complex Permittivity Extraction, Applications, Open Challenges and Future Research Directions // *Sensors*. – 2021. – 21, 2267. – DOI: 10.3390/s21072267.
16. *Khair N.S., Yusof N.A.T., Wahab Y.A., et al.* Substrate-integrated waveguide (SIW) microwave sensor theory and model in characterising dielectric material: A review // *Sensors International*. – 2023. – Vol. 4. – P. 100244. – DOI: 10.1016/j.sintl.2023.100244.
17. *Nahid A.A., et al.* Characterization of alumina ribbon ceramic substrates for 5G and mm-wave applications // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. – 2022. – 12.9. – P. 1432-1445.
18. *Liu X., Gan L., Yang B.* Millimeter-wave free-space dielectric characterization // *Measurement*. – 2021. – Vol. 179. – P. 109472. – DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109472.
19. *Kok Yeow Y., Goudos Sotirios K.* Materials characterization using microwave waveguide system // *Microwave systems and applications*. – 2017. – P. 341-358.
20. *Das N.K., Voda S.M., Pozar D.M.* Two Methods for the Measurement of Substrate Dielectric Constant // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – July 1987. – Vol. 35, No. 7. – P. 636-642.
21. *Гусев Ю.А.* Основы диэлектрической спектроскопии: учеб. пособие. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2008. – 112 с.
22. *Dmitriev-Zdorov V., Simonovich B., Kochikov I.* A causal conductor roughness model and its effect on transmission line characteristics // *Proc. DesignCon*. – 2018. – P. 1-31.
23. *Wang H. B., Cheng Y. J.* Broadband Printed-Circuit-Board Characterization Using Multimode Substrate-Integrated-Waveguide Resonator // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – June 2017. – Vol. 65, No. 6. – P. 2145-2152.
24. *Garg R., Bahl I., Bozzi M.* Microstrip lines and slotlines. – Norwood: Artech house, 2013. – 560 p.
25. *RO3003G2 Laminates.* RO3003G2 Laminates Data Sheet. – URL: <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro3000-series-laminates/ro3003g2-laminates> (дата обращения: 30.09.2024).
26. *Yan L., Hong W., Hua G., et al.* Simulation and experiment on SIW slot array antennas // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – Sept. 2004. – Vol. 14, No. 9. – P. 446-448. – DOI: 10.1109/LMWC.2004.832081.
27. *Canós, A.J., Catalá-Civera, J.M., Penaranda-Foix F.L., Reyes-Davo E.* A novel technique for deembedding the unloaded resonance frequency from measurements of microwave cavities // *IEEE transactions on microwave theory and techniques*. – 2006. – 54 (8). – P. 3407-3416.
28. *Kajfez D.* Q Factor Measurements Using MATLAB. – Norwood: Artech house, 2011. – 189 p.

REFERENCES

1. *Wang C., Liu X., Huang Z., Yu S., et al.* A Sensor for Characterisation of Liquid Materials with High Permittivity and High Dielectric Loss, *Sensors*, 2022, 22, 1764. DOI: 10.3390/s22051764.
2. *Shiheng H., Huang J.* A Novel Substrate Integrated Waveguide Shorted Coaxial Resonator for Characterizing Complex Permittivity of Liquids and Solid Content of Water-based Ferrofluid, *IEEE Sensors Journal*, 1 July, 2024, Vol. 24, No. 13, pp. 20549-20558. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3399323.
3. *Vergnano A., Godio A., Raffa CM., et al.* Open-Ended Coaxial Probe Measurements of Complex Dielectric Permittivity in Diesel-Contaminated Soil during Bioremediation, *Sensors*, 2020, 20 (22):6677. DOI: 10.3390/s20226677.
4. *Zha J.W., et al.* Polymer-based dielectrics with high permittivity for electric energy storage: A review, *Nano Energy*, 2021, 89, 106438.
5. *Takenori K., et al.* Material design and high frequency characterization of novel ultra-low loss dielectric material for 5G and 6G applications, *2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*. IEEE, 2021, pp. 538-543.
6. *Krupka J., Pacewicz A., Kopyt P., Salski P.* Measurements of the complex permittivity of low loss ferrites at millimeter wave frequencies, *Materials Research Bulletin*, 2024, Vol. 179, pp. 112994. DOI: 10.1016/j.materresbull.2024.112994.
7. *Mosavirak T., Hashemi M., Soleimani M., et al.* Accuracy-Improved and Low-Cost Material Characterization Using Power Measurement and Artificial Neural Network, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 70, pp. 1-9, 202. DOI: 10.1109/TIM.2021.3126011.

8. Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P., Varadan V.V., Varadan V.K. Microwave electronics. Measurements and materials characterization. John Wiley & Sons, 2004, 552 p.
9. Belov Yu.G., Kuzheleva A.A., Nefed'ev I.A. Tsilindricheskii rezonator dlya izmereniya parametrov dielektricheskikh plastin [Cylindric resonator for dielectric slabs characterisation], *Informacionnye sistemy i tehnologii* [Information systems and technologies], *Sbornik materialov XXV Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the XXV international conference], 2019, pp. 199-204.
10. Krupka J. Measurements of the Complex Permittivity of Low Loss Polymers at Frequency Range From 5 GHz to 50 GHz, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, Vol. 26, No. 6, pp. 464-466.
11. Marqués-Villarroya D., et al. Enhanced Full-Wave Circuit Analysis for Modeling of a Split Cylinder Resonator, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, Vol. 65, No. 4, pp. 1191-1202.
12. Possenti L. et al. Improved Fabry-Pérot electromagnetic material characterization: Application and results, *Radio Science*, Nov. 2020, Vol. 55, No. 11, pp. 1-15. DOI 10.1029/2020RS007164.
13. Naoki H., et al. Measurement technique for interface and surface conductivities at millimeter-wave frequencies using dielectric rod resonator excited by nonradiative dielectric waveguide, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2022, 70.5, pp. 2750-2761.
14. Walia G., Laforge P. D., Azam S., Paranthaman R. Dielectric Characterization Using Reflected Group Delay of a Partially Filled Coaxial Resonator, *IEEE Access*, 2024, Vol. 12, pp. 123581-123594. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3453658.
15. Alahmomi R.A., Zakaria, Z., Yusof Z.M., et al. Review of Recent Microwave Planar Resonator-Based Sensors: Techniques of Complex Permittivity Extraction, Applications, Open Challenges and Future Research Directions, *Sensors*, 2021, 21, 2267. DOI: 10.3390/s21072267.
16. Khair N.S., Yusof N.A.T., Wahab Y.A., et al. Substrate-integrated waveguide (SIW) microwave sensor theory and model in characterising dielectric material: A review, *Sensors International*, 2023, Vol. 4, pp. 100244. DOI: 10.1016/j.sintl.2023.100244.
17. Nahid A.A., et al. Characterization of alumina ribbon ceramic substrates for 5G and mm-wave applications, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2022, 12.9, pp. 1432-1445.
18. Liu X., Gan L., Yang B. Millimeter-wave free-space dielectric characterization, *Measurement*, 2021, Vol. 179, pp. 109472. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109472.
19. Kok Yeow Y., Goudos Sotirios K. Materials characterization using microwave waveguide system, *Microwave systems and applications*, 2017, pp. 341-358.
20. Das N.K., Voda S.M., Pozar D.M. Two Methods for the Measurement of Substrate Dielectric Constant, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, July 1987, Vol. 35, No. 7, pp. 636-642.
21. Gusev Yu. A. Osnovy dielektricheskoy spektroskopii: ucheb. posobie [Foundations of dielectric spectroscopy: textbook]. Kazan': Kazan. gos. un-t, 2008, 112 p.
22. Dmitriev-Zdorov V., Simonovich B., Kochikov I. A causal conductor roughness model and its effect on transmission line characteristics, *Proc. DesignCon.*, 2018, pp. 1-31.
23. Wang H. B., Cheng Y. J. Broadband Printed-Circuit-Board Characterization Using Multimode Substrate-Integrated-Waveguide Resonator, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, June 2017, Vol. 65, No. 6, pp. 2145-2152.
24. Garg R., Bahl I., Bozzi M. Microstrip lines and slotlines. Norwood: Artech house, 2013, 560 p.
25. RO3003G2 Laminates. RO3003G2 Laminates Data Sheet. Available at: <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro3000-series-laminates/ro3003g2-laminates> (accessed 30 September 2024).
26. Yan L., Hong W., Hua G., et al. Simulation and experiment on SIW slot array antennas, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Sept. 2004, Vol. 14, No. 9, pp. 446-448. DOI: 10.1109/LMWC.2004.832081.
27. Canós, A.J., Catalá-Civera, J.M., Penaranda-Foix F.L., Reyes-Davo E. A novel technique for deembedding the unloaded resonance frequency from measurements of microwave cavities, *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2006, 54 (8), pp. 3407-3416.
28. Kajfez D. Q Factor Measurements Using MATLAB. Norwood: Artech house, 2011, 189 p.

Мигалин Михаил Михайлович – Южный федеральный университет; e-mail: migalin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371733; кафедра антенн и радиопередающих устройств; аспирант.

Обуховец Виктор Александрович – e-mail: vaobuhovec@sfedu.ru; кафедра антенн и радиопередающих устройств; профессор; д.т.н.; профессор.

Migalin Mikhail Mikhaylovich – Southern Federal University; e-mail: migalin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371733; the Department of Antennas and Radio Transmitters; postgraduate.

Obukhovets Viktor Alexandrovich – e-mail: vaobuhovec@sfedu.ru; the Department of Antennas and Radio Transmitters; professor; dr. of eng. sc.; professor.