

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2021.5.3.002

УДК 621.372.54

## Частотно-перестраиваемое устройство на основе многослойного полосково-щелевого перехода и его применение для измерения диэлектрических свойств материалов

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

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

 Fomin95@ya.ru

### Аннотация

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований частотно-перестраиваемого устройства на основе многослойного полосково-щелевого (МПЩ) перехода с П-образным щелевым резонатором. Использование данного устройства позволяет реализовать резонансный метод измерения диэлектрических свойств материалов в сверхвысокочастотном диапазоне. Теоретические исследования заключаются в проведении численного моделирования в строгой постановке электродинамической задачи, направленной на определение характеристик МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором переменной длины. Результаты численного моделирования доказывают возможность применения МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором переменной длины для реализации резонансного метода измерения диэлектрических свойств материалов в указанном диапазоне частот. Экспериментальные исследования проведены на макете МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором переменной длины в диапазоне частот (850–1250) МГц. Оценка его резонансных свойств осуществлялась при использовании векторного анализатора цепей OBZOR TR1300/1. В качестве исследуемого материала использовался материал  $\text{BaFe}_{10}\text{Ti}_2\text{O}_{19}$ . Результаты теоретических и экспериментальных исследований находятся в хорошем количественном и качественном согласовании.

### Ключевые слова

П-образный щелевой резонатор, многослойный полосково-щелевой переход, порошковые материалы, резонансный метод измерения

### Для цитирования

Фомин Д. Г., Дударев Н. В., Даровских С. Н. Частотно-перестраиваемое устройство на основе многослойного полосково-щелевого перехода и его применение для измерения диэлектрических свойств материалов. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(3):225–238. DOI: 10.15826/urej.2021.5.3.002.

© Фомин Д. Г., Дударев Н. В., Даровских С. Н., 2021

## Frequency-tunable device based on a multilayer strip-slot transition and its application for measuring the dielectric properties of materials

D. G. Fomin ✉, N. V. Dudarev, S. N. Darovskikh

South Ural State University (National Research University),  
76 Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russia

✉ Fomin95@ya.ru

### Abstract

The paper presents the results of theoretical and experimental researches of a frequency-tunable device based on the multilayer strip-slot transition with the U-shaped slot resonator of the variable length. The application of the presented device makes it possible to implement a resonant method for measuring the dielectric properties of materials in the microwave frequency range. The numerical simulation in the rigorous formulation of the electrodynamics problem is performed for the theoretical research. The aim of the theoretical research is to determine the electrical characteristics of the multilayer strip-slot transition with the U-shaped slot resonator of the variable length. The results of numerical simulation prove the possibility of applying the multilayer strip-slot transition with the U-shaped slot resonator of the variable length to implement the resonant method for measuring the dielectric properties of materials in the microwave frequency range. The experimental research is performed on the sample of the multilayer strip-slot transition with the U-shaped slot resonator of the variable length in the frequency range (850–1250) MHz. Measurements of S-parameters of the multilayer strip-slot transition with the U-shaped slot resonator of the variable length are accomplished using the vector network analyzer. The material under research is  $\text{BaFe}_{10}\text{Ti}_2\text{O}_{19}$ . The results of theoretical and experimental researches are in good qualitative and quantitative agreement.

### Keywords

U-shaped slot resonator, multilayer strip-slot transition, powder materials, resonant measurement method

### For citation

Fomin D. G., Dudarev N. V., Darovskikh S. N. Frequency-tunable device based on a multilayer strip-slot transition and its application for measuring the dielectric properties of materials. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(3):225–238 (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2021.5.3.002.

### Введение

Важной задачей эксплуатации и исследования перспективных композитных материалов, применяемых в радиоэлектронике, является оценка их диэлектрических свойств. Причем с развитием радиоэлектронной отрасли происходит повышение требований к точности их определения. Существующие на сегодняшний день методы исследования диэлектрических свойств материалов

можно подразделить на два класса: нерезонансные и резонансные [1–5]. При этом нерезонансные методы целесообразно применять при осуществлении неразрушающего контроля материалов листовой формы большой площади. Резонансные методы применяются при ограниченном количестве исследуемого вещества и малых его размерах, включая порошковое его состояние [6].

Основной проблемой, возникающей при использовании резонансных методов оценки диэлектрических свойств материалов, является возможность проведения их анализа только на фиксированной частоте при использовании соответствующего резонатора. По этой причине для исследования диэлектрических свойств материалов в широком диапазоне частот требуется набор из нескольких резонаторов с разной собственной частотой резонанса. В этой связи представляется целесообразным исследовать применение частотно-перестраиваемого устройства на основе многослойного полосково-щелевого перехода. Целью настоящей работы является исследование частотно-перестраиваемого устройства, которое может быть применено в качестве резонатора при измерении диэлектрических свойств материалов в широком диапазоне частот. Главной особенностью исследуемого устройства является возможность плавного изменения частоты собственного резонанса, что позволяет проводить анализ свойств исследуемых материалов в широком диапазоне частот.

## 1. Конструкция МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором переменной длины

Многослойный полосково-щелевой (МПЩ) переход с П-образным щелевым резонатором переменной длины – это двухпортовое устройство, реализованное с применением объемно-модульной технологии, предназначенное для частотно-избирательной бесконтактной передачи СВЧ-сигнала между частями объемно-модульных интегральных схем [7–10]. Подобное устройство может использоваться для оценки диэлектрических свойств материалов. Конструктивно многослойный полосково-щелевой переход состоит (рис. 1а) из двух полосковых линий передачи, размещенных на отдельных диэлектрических платах 1, 2, расположенных с разных сторон от металлического основания 3, в котором вырезан сквозной П-образный щелевой резонатор 4. Полосковые линии перекрещиваются с щелевым резонатором и заканчиваются обрывом на расстоянии четверти длины волны ( $\lambda/4$ ) от места перекрещивания [7]. Подобное расположение полосковой линии относительно щелевого резонатора необходимо для обеспечения наилучшего согласования между ними [11–13]. В металлическом основании на специальных пазах

в П-образный щелевой резонатор устанавливается перемычка 5, расположенная вдоль коротких кромок П-образного щелевого резонатора (рис. 1б) и электрически замыкающая длинные кромки щелевого резонатора в месте своего размещения.

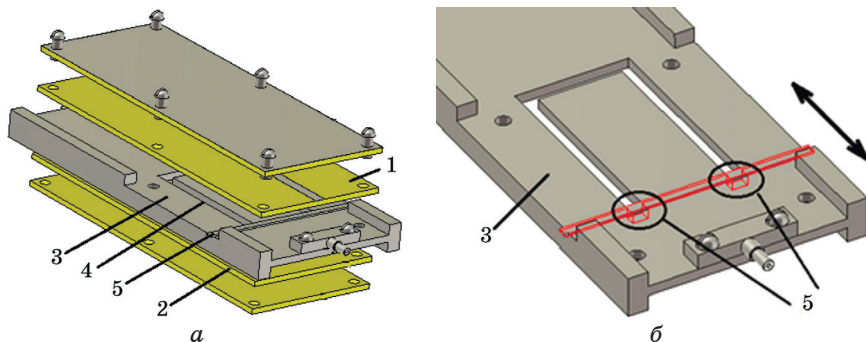


Рис. 1. Модель МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором переменной длины

Fig. 1. The model of the multilayer strip-slot transition with the U-shaped slot resonator of the variable length

Перемычка 5 перемещается вдоль П-образного щелевого резонатора, изменяя его электрическую длину за счет замыкания боковых плеч (рис. 2).

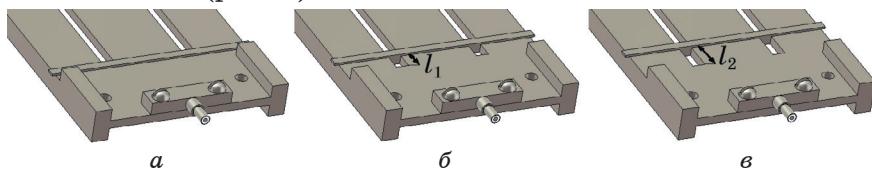


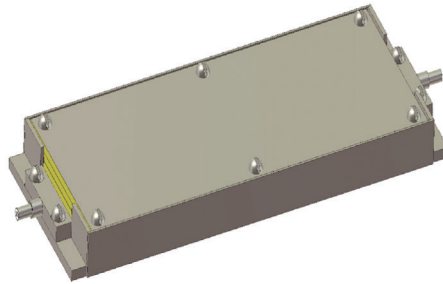
Рис. 2. Схема размещения перемычки в П-образном щелевом резонаторе

Fig. 2. The layout of the bridge in the U-shaped slot resonator

## 2. Теоретические исследования МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором переменной длины

Для теоретического исследования электрических характеристик МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором переменной длины проведено численное моделирование в строгой постановке электродинамической задачи в программе ANSYS HFSS. Для расчета компьютерной модели МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором (рис. 3) использовался метод конечных элементов [14]. Исследование выполнено с использованием суперкомпьютерных ресурсов НИУ ЮУрГУ [15]. При этом конструкция МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором переменной длины выполнена с использованием

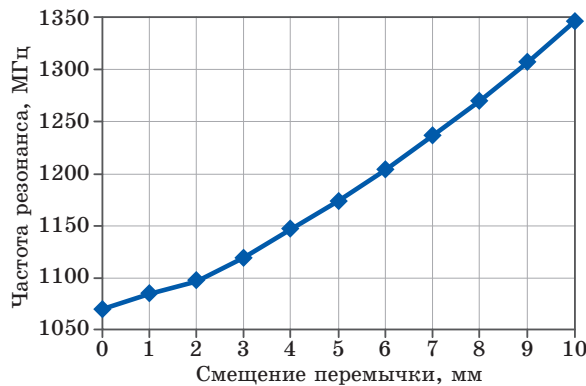
фольгированного диэлектрика Arlon AD350. Волновое сопротивление полосковых линий 50 Ом, длина П-образного щелевого резонатора составляет половину длины волны ( $\lambda/2$ ) на центральной частоте, длина резонаторов с холостым ходом на конце составляет четверть длины волны ( $\lambda/4$ ) на центральной частоте. Расчет длин резонаторов осуществлялся с учетом коэффициента укорочения в многослойной диэлектрической конструкции [7]. Размер диэлектрических подложек – 80 мм x 40 мм. Толщина металлического основания – 2 мм.



**Рис. 3.** Компьютерная модель МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором

**Fig. 3.** Computer model of the multilayer strip-slot transition with the U-shaped slot resonator

В результате численного моделирования была установлена зависимость частоты резонанса МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором от смещения перемычки. При этом рассматривалось десять дискретных положений перемычки при ее смещении относительно коротких кромок щелевого резонатора на расстояние от 0 мм до 10 мм (рис. 4).



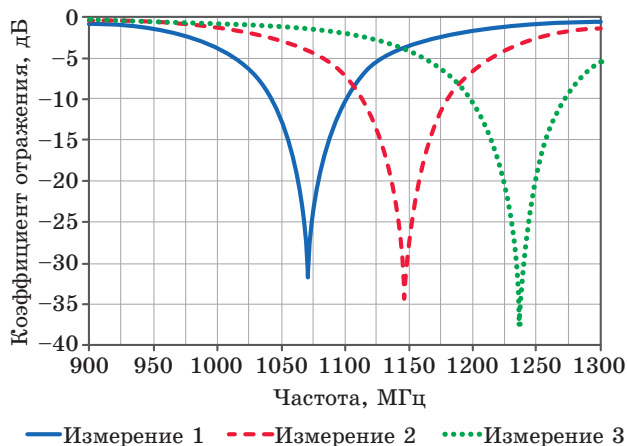
**Рис. 4.** Зависимость частоты резонанса МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором от смещения перемычки

**Fig. 4.** Dependence of the resonance frequency of the multilayer strip-slot transition with the U-shaped slot resonator on the displacement of the bridge

Из результатов моделирования следует, что при смещении перемычки от коротких кромок щелевого резонатора на расстояние от 0 мм до 10 мм, частота резонанса МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором изменяется от 1071 МГц до 1347 МГц.

Для подробного анализа применения МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором переменной длины в качестве устройства для измерения диэлектрических свойств материалов, рассмотрим три случая положения перемычки (рис. 2). Первое положение – перемычка находится около короткой кромки П-образного щелевого резонатора и не уменьшает его длину (рис. 2а, измерение 1). Второе положение – перемычка отодвинута на 4 мм от короткой кромки П-образного щелевого резонатора (рис. 2б, измерение 2). Третье положение – перемычка отодвинута на 7 мм от короткой кромки П-образного щелевого резонатора (рис. 2в, измерение 3).

Изначально рассмотрим случай, при котором П-образный щелевой резонатор имеет воздушное заполнение. Результаты моделирования представлены в виде зависимостей коэффициента отражения в диапазоне частот (рис. 5).

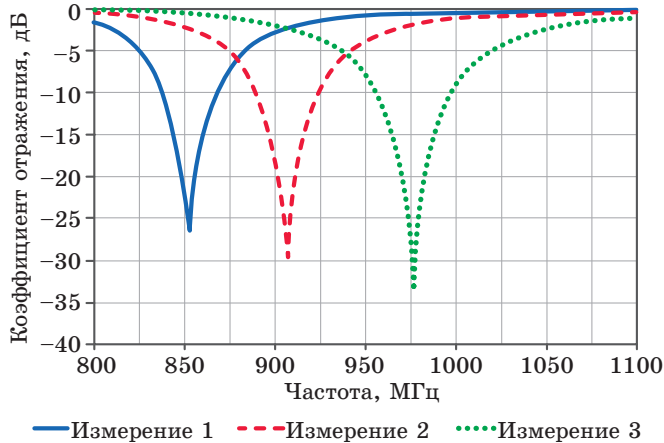


**Рис. 5.** Зависимость коэффициента отражения ( $S_{11}$ ) МПЩ-перехода в диапазоне частот от положения перемычки при воздушном заполнении щелевого резонатора

**Fig. 5.** The reflection coefficient ( $S_{11}$ ) in the frequency range vs. the position of the bridge with the air filling of the slot resonator

Из результатов моделирования следует: при смещении перемычки от коротких кромок щелевого резонатора от 0 мм (измерение 1) до 7 мм (измерение 3) происходит смещение частоты резонанса МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором на 165 МГц. Его амплитудное значение изменяется в пределах от минус 31,2 дБ до минус 37,3 дБ.

Далее рассмотрен случай, при котором П-образный щелевой резонатор МПЩ-перехода заполнен диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью 10,5. Результаты моделирования представлены в виде зависимостей коэффициента отражения в диапазоне частот (рис. 6).



— Измерение 1    - - - Измерение 2    ..... Измерение 3

**Рис. 6.** Зависимость коэффициента отражения ( $S_{11}$ ) МПЩ-перехода в диапазоне частот от положения перемычки при заполнении щелевого резонатора диэлектриком  
**Fig. 6.** The reflection coefficient ( $S_{11}$ ) in the frequency range vs. the position of the bridge with dielectric material filling of the slot resonator

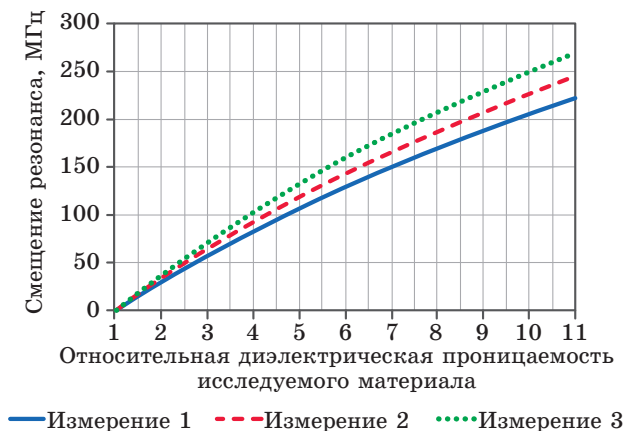
Из результатов моделирования следует, что при заполнении щелевого резонатора материалом с относительной диэлектрической проницаемостью 10,5, происходит смещение резонанса МПЩ-перехода в более низкочастотный диапазон. При этом при смещении перемычки от коротких кромок щелевого резонатора от 0 мм (измерение 1) до 7 мм (измерение 3) происходит смещение частоты его резонанса на 119,5 МГц. Его амплитудное значение изменяется в пределах от минус 26,5 дБ до минус 33 дБ.

Аналогичным образом установлено, что для трех рассматриваемых конфигураций МПЩ-перехода, зависимость частоты смещения резонанса от относительной диэлектрической проницаемости исследуемого материала определяется функциями, представленными на рис. 7.

Из графика для измерения 1, представленного на рис. 7 следует, что при заполнении П-образного щелевого резонатора длиной  $\lambda/2$  порошковым материалом с относительной диэлектрической проницаемостью 11, величина смещения резонанса составляет 223 МГц. Аналогичным образом можно проанализировать зави-



симости для МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором, уменьшенным суммарно на 8 мм (измерение 2) и на 14 мм (измерение 3).



**Рис. 7.** Зависимости частоты смещения резонанса МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором от относительной диэлектрической проницаемости исследуемого порошкового материала для трех конфигураций МПЩ-перехода

**Fig. 7.** The resonance displacement frequency vs. the relative dielectric constant of the investigated powder material for three configurations of the multilayer strip-slot transition

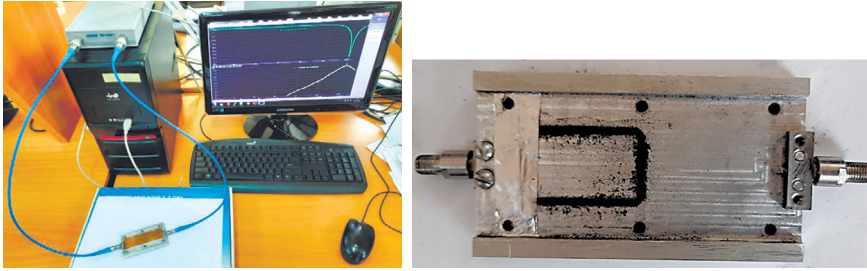
Таким образом, в результате изменения длины П-образного щелевого резонатора меняется собственная частота резонанса МПЩ-перехода и, как следствие, появляется возможность измерения диэлектрических свойств материалов в широком диапазоне частот.

### 3. Экспериментальное исследование

Для экспериментального исследования МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором переменной длины разработан макет (рис. 8). Для изготовления макета использован фольгированный диэлектрик Arlon AD350. При измерении электрических характеристик макета использовался векторный анализатор цепей OBZOR TR1300/1.

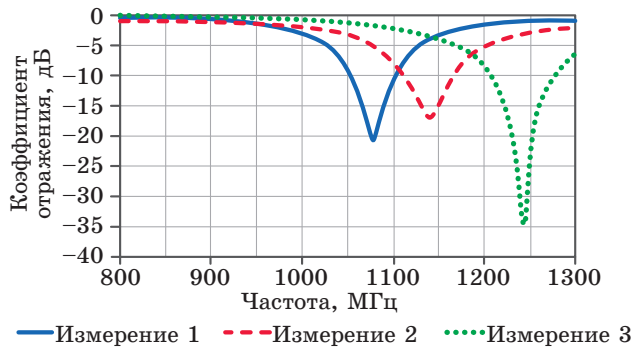
Результаты измерений, полученные на макете МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором переменной длины, представлены в виде зависимостей коэффициента отражения в диапазоне частот (рис. 9, 10). В качестве материала-наполнителя использовался порошковый материал  $\text{BaFe}_{10}\text{Ti}_2\text{O}_{19}$ , относительная диэлектрическая проницаемость которого составляет  $10,5 \pm 0,5$  в исследуемом диапазоне частот [16].





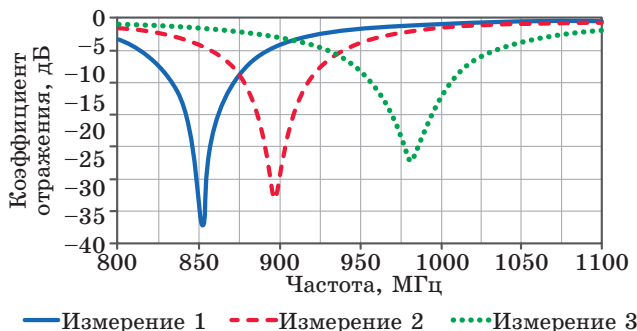
**Рис. 8.** Фото измерительной установки и макета МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором переменной длины

**Fig. 8.** Photo of the measuring setup and the sample of the multilayer strip-slot transition with the U-shaped slot resonator of the variable length



**Рис. 9.** Экспериментально полученные зависимости коэффициента отражения ( $S_{11}$ ) в диапазоне частот при воздушном заполнении щелевого резонатора

**Fig. 9.** Experimentally obtained dependences of the reflection coefficient ( $S_{11}$ ) in the frequency range with the air filling of the slot resonator



**Рис. 10.** Экспериментально полученные зависимости коэффициента отражения ( $S_{11}$ ) в диапазоне частот при заполнении щелевого резонатора порошковым материалом

**Fig. 10.** Experimentally obtained dependences of the reflection coefficient ( $S_{11}$ ) in the frequency range with the powder material filling of the slot resonator

#### 4. Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов

Сопоставление результатов теоретического (рис. 5, 6) и экспериментального (рис. 9, 10) исследований свидетельствует о высокой степени совпадения (табл. 1). Выявлено, что максимальное отклонение частоты резонанса полученной теоретическим путем от частоты резонанса полученной экспериментальным путем составляет не более 10 МГц. При пересчете полученных экспериментальных данных в диэлектрические свойства исследуемого материала отклонение значений последнего имеет разброс не более 5 % от номинала относительной диэлектрической проницаемости. Так, для случая с длиной щелевого резонатора  $\lambda/2$  (измерение 1) относительная диэлектрическая проницаемость при теоретическом исследовании составляла  $\epsilon_r = 10,5$ , при этом по результатам экспериментального исследования относительная диэлектрическая проницаемость колеблется в пределах от  $\epsilon_r = 10,6$  до  $\epsilon_r = 11$ , что подтверждается экспериментальными данными, представленными в работе [16].

**Таблица 1.** Сопоставление результатов теоретического и экспериментального исследований

**Table 1.** Comparison of the results of theoretical and experimental researches

Характеристики		Номер измерения					
		1		2		3	
		Теория	Эксперимент	Теория	Эксперимент	Теория	Эксперимент
Воздушное заполнение	Центральная частота, МГц	1071	1075	1146,5	1141	1236	1242
Заполнение порошковым материалом	Центральная частота, МГц	853	852	907	897	976,5	980
Смещение частоты резонанса, МГц		218	223	239,5	244	259,5	262
Относительная диэлектрическая проницаемость (рис. 7)		10,5	11	10,5	10,8	10,5	10,6

## Заключение

В работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследований МПЩ-перехода с П-образным щелевым резонатором переменной длины. Теоретические результаты получены путем численного электродинамического моделирования. Экспериментальные результаты получены на макете устройства при использовании векторного анализатора цепей. Теоретические и экспериментальные результаты исследований находятся в хорошем качественном и численном соответствии друг с другом. Результаты исследования подтверждают гипотезу о возможности использования многослойного полосково-щелевого перехода с П-образным щелевым резонатором переменной длины в качестве устройства для измерения диэлектрических свойств материалов резонансным методом. Диапазон измерения диэлектрических свойств материалов для представленного макета составляет от 1071 МГц до 1347 МГц. Погрешность измерения относительной диэлектрической проницаемости исследуемых материалов составляет не более 5 %.

## Список литературы

1. 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;(1):297–311. DOI: 10.1590/2179-10742017v16i1890
2. Беляев А. А., Романов А. М., Широков В. В., Шульдешов Е. М. Измерение диэлектрической проницаемости стеклотекстолита в свободном пространстве. *Труды ВИАМ*. 2014;(5):6. DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-6-6
3. 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. In: *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), Yekaterinburg, 14–15 May 2020*. IEEE; 2020, pp. 322–325. DOI: 10.1109/USBREIT48449.2020.9117619
4. Handoko E., Mangasi A. M., Iwan S., Randa M., Alaydrus M. Measurement of complex permittivity and permeability of hexagonal ferrite composite material using a waveguide in microwave band. In: *2016 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET), Jakarta, 3–5 Oct. 2016*. IEEE; 2016, pp. 28–30. DOI: 10.1109/ICRAMET.2016.7849576
5. Gonzalves 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;7(10):260. DOI: 10.3390/electronics7100260
6. Дьяконова О. А., Казанцев Ю. Н., Каленов Д. С. Измерительный комплекс для определения электромагнитных характеристик матери-

алов резонаторным методом с помощью скалярных анализаторов цепей. *Журнал радиоэлектроники*. 2017;(7):7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul17/7/text.pdf>

7. Фомин Д.Г., Дударев Н.В., Даровских С.Н., Баранов В.К. Исследование объемного полосково-щелевого перехода с П-образным щелевым резонатором. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(3):277–292. DOI: 10.15826/urej.2020.4.3.002

8. Yang L., Zhu L., Choi W.-W., Tam K.-W. Analysis and design of wideband microstrip-to-microstrip equal ripple vertical transitions and their application to bandpass filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017;65(8):2866–2877. DOI: 10.1109/TMTT.2017.2675418

9. Tao Z., Zhu J., Zuo T., Pan L., Yu Y. Broadband microstrip-to-microstrip vertical transition design. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2016;26(9):660–662. DOI: 10.1109/LMWC.2016.2597234

10. Fomin D.G., Dudarev N.V., Darovskikh S.N. Scattering matrix simulation of the volumetric strip-slot transition and estimation of its frequency properties. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;(1679):22032. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022032

11. Lee J.S., Lee G.H., Mohyuddin W., Choi H.C., Kim K.W. Design of an ultra-wideband microstrip-to-slotline transition on low-permittivity substrate. *Electronics*. 2020;9(8):1329. DOI: 10.3390/electronics9081329

12. Gupta K.C., Bhartia P., Garg R., Bahl I. *Microstrip lines and slotlines*. 2<sup>nd</sup> ed. Norwood, MA: Artech House; 1996. 547 p.

13. Гвоздев В.И., Нефедов Е.И. Объемные интегральные схемы СВЧ. М.: Наука; 1985. 256 с.

14. Volakis J.L., Chatterjee A., Kempel L.C. *Finite Element Method Electromagnetics: Antennas, Microwave Circuits, and Scattering Applications*. Wiley-IEEE Press; 1998. 368 p. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=5265513>

15. Kostenetskiy P., Semenikhina P. SUSU Supercomputer Resources for Industry and fundamental Science. In: *2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, 13–15 Nov. 2018*. IEEE; 2018, pp. 1–7. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570068

16. Vinnik D.A., Klygach D.S., Zhivulin V.E., Malkin A.I., Vakhitov M.G., Gudkova S.A., Galimov D.M., Zherebtsov D.A., Trofimov E.A., Knyazev N.S., Atuchin V.V., Trukhanov S.V., Trukhanov A.V. Electromagnetic properties of BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>:Ti at centimeter wavelengths. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;(755):177–183. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.04.315

## References

1. 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;(1):297–311. DOI: 10.1590/2179-10742017v16i1890

2. Beljaev A.A., Romanov A.M., Shirokov V.V., Shuldeshov E.M. Measurement of honeycomb glass fiber plastics permittivity in free space.

*Proceedings of VIAM*. 2014;(5):6. (In Russ.) DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-6-6

3. 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. In: *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*, Yekaterinburg, 14–15 May 2020. IEEE; 2020, pp. 322–325. DOI: 10.1109/USBREIT48449.2020.9117619

4. Handoko E., Mangasi A. M., Iwan S., Randa M., Alaydrus M. Measurement of complex permittivity and permeability of hexagonal ferrite composite material using a waveguide in microwave band. In: *2016 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, Jakarta, 3–5 Oct. 2016. IEEE; 2016, pp. 28–30. DOI: 10.1109/ICRAMET.2016.7849576

5. Gonzalves 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;7(10):260. DOI: 10.3390/electronics7100260

6. Diyakonova O. A., Kazantsev Yu. N., Kalenov D. S. Measuring complex for determining the electromagnetic characteristics of materials by the resonator method using scalar network analyzers. *Journal of Radio Electronics*. 2017;(7):7. (In Russ.) Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jul17/7/text.pdf>

7. Fomin D. G., Dudarev N. V., Darovskikh S. N., Baranov V. K. The Investigation of the Volumetric Strip-Slot Transition with U-Shaped Slot Resonator. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(3):277–292. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2020.4.3.002

8. Yang L., Zhu L., Choi W.-W., Tam K.-W. Analysis and design of wideband microstrip-to-microstrip equal ripple vertical transitions and their application to bandpass filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017;65(8):2866–2877. DOI: 10.1109/TMTT.2017.2675418

9. Tao Z., Zhu J., Zuo T., Pan L., Yu Y. Broadband microstrip-to-microstrip vertical transition design. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2016;26(9):660–662. DOI: 10.1109/LMWC.2016.2597234

10. Fomin D. G., Dudarev N. V., Darovskikh S. N. Scattering matrix simulation of the volumetric strip-slot transition and estimation of its frequency properties. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;(1679):22032. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022032

11. Lee J. S., Lee G. H., Mohyuddin W., Choi H. C., Kim K. W. Design of an ultra-wideband microstrip-to-slotline transition on low-permittivity substrate. *Electronics*. 2020;9(8):1329. DOI: 10.3390/electronics9081329

12. Gupta K. C., Bhartia P., Garg R., Bahl I. *Microstrip lines and slotlines*. 2<sup>nd</sup> ed. Norwood, MA: Artech House; 1996. 547 p.

13. Gvozdev V. I., Nefedov E. I. *Volumetric integrated microwave circuits*. Moscow: Nauka; 1985. 256 p. (In Russ.)

14. Volakis J. L., Chatterjee A., Kempel L. C. *Finite Element Method Electromagnetics: Antennas, Microwave Circuits, and Scattering Applications*. Wiley-IEEE Press; 1998. 368 p. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=5265513>

15. Kostenetskiy P., Semenikhina P. SUSU Supercomputer Resources for Industry and fundamental Science. In: *2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, 13–15 Nov. 2018*. IEEE; 2018, pp. 1–7. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570068

16. Vinnik D. A., Klygach D. S., Zhivulin V. E., Malkin A. I., Vakhtov M. G., Gudkova S. A., Galimov D. M., Zherebtsov D. A., Trofimov E. A., Knyazev N. S., Atuchin V. V., Trukhanov S. V., Trukhanov A. V. Electromagnetic properties of BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>:Ti at centimeter wavelengths. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;(755):177–183. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.04.315

### Информация об авторах

**Фомин Дмитрий Геннадьевич**, аспирант кафедры «Инфокоммуникационные технологии», Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Россия, 454080, Челябинск, проспект Ленина, 76.

**Дударев Николай Валерьевич**, кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры «Инфокоммуникационные технологии», Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Россия, 454080, Челябинск, проспект Ленина, 76.

**Даровских Станислав Никифорович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Инфокоммуникационные технологии», Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Россия, 454080, Челябинск, проспект Ленина, 76.

### Information about the authors

**Dmitriy G. Fomin**, Post-Graduate Student of the Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University (National Research University), 76 Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russia.

**Nikolay V. Dudarev**, Ph.D., Researcher of the Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University (National Research University), 76 Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russia.

**Stanislav N. Darovskikh**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University (National Research University), 76 Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russia.

Поступила / Received: 19.07.2021

Принята в печать / Accepted: 19.09.2021