

**Измерение диэлектрической проницаемости композитных наноматериалов с использованием микрополоскового встречно-штыревого резонатора в сантиметровом диапазоне радиоволн***С. Ю. Молчанов, Н. М. Ушаков, А. Н. Литвиненко*

*Проведено математическое моделирование конструкции микрополосковой линии со встречно-штыревым резонатором в сантиметровом диапазоне радиоволн. Выбраны её оптимальные параметры для установки резонанса в коротковолновой области СВЧ-диапазона. Описано поведение данной встречно-штыревой структуры, нагруженной толстопленочными образцами материалов с диэлектрической проницаемостью от 0,1 до 10. Рассмотрено применение встречно-штыревой структуры для определения диэлектрической проницаемости композитных наноматериалов в СВЧ-диапазоне. Изготовлены макеты данной структуры и проведены измерения действительной части диэлектрической проницаемости полимерных композитных наноматериалов на основе матриц из полиэтилена низкой плотности и полиметилметакрилата.*

*Ключевые слова:* СВЧ-диапазон, композитный наноматериал, диэлектрическая проницаемость, встречно-штыревой резонатор, микрополосковая линия.

**Ссылка:** Молчанов С. Ю., Ушаков Н. М., Литвиненко А. Н. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 5. С. 519.

**Reference:** S. Yu. Molchanov, N. M. Ushakov, and A. N. Litvinenko, Usp. Prikl. Fiz. 7 (5), 519 (2019).

**Введение**

Для определения диэлектрических свойств твердых образцов применяют различные ме-

тоды измерения, исходя из требуемого частотного диапазона, ожидаемого значения диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , максимально допустимой погрешности, вида материала и стоимости [1].

В СВЧ-диапазоне широко используется метод измерения диэлектрической проницаемости с помощью линии передачи. Он покрывает широкий диапазон частот, но требует изготовления образца тороидальной формы с высокой точностью в случае коаксиальной линии передачи и накладывает ограничения по размеру плоского образца для волноводной линии [2].

Высокой чувствительностью обладает микрополосковый метод измерения диэлектрических параметров. Он позволяет производить измерения в низкочастотной области СВЧ-диапазона, где измерительные ячейки для других методов имеют внушительные габариты, и не накладывает жёстких ограниче-

---

**Молчанов Сергей Юрьевич**<sup>1</sup>, вед. инженер, к.т.н.

**Ушаков Николай Михайлович**<sup>2</sup>, гл.н.с., д.ф.-м.н., профессор.

**Литвиненко Артём Николаевич**<sup>3</sup>, инженер, к.ф.-м.н.

<sup>1</sup> Институт физики твердого тела РАН (ИФТТ РАН).  
Россия, 142432, Московская обл., г. Черноголовка,  
ул. Академика Осипяна, 2.

Тел. +7(49652) 2-44-31. E-mail: canishe@yandex.ru

<sup>2</sup> Саратовский филиал Института радиотехники  
и электроники им. В. А. Котельникова РАН  
(СФ ИРЭ РАН).

Россия, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, 38.

Тел. +7(845) 27-24-01. E-mail: nmu@bk.ru

<sup>3</sup> Саратовский Государственный Университет  
им. Н. Г. Чернышевского (СГУ).

Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83.

*Статья поступила в редакцию 19 августа 2019 г.*

© Молчанов С. Ю., Ушаков Н. М., Литвиненко А. Н., 2019

ний по геометрическим размерам образца. В большинстве случаев техника измерения диэлектрической проницаемости образцов с помощью микрополосковой линии достаточно проста.

Для измерения диэлектрической проницаемости до 10 ГГц в работах [3–6] предложено использовать резонатор встречно-штыревого типа. Стоит отметить, что данные системы обеспечивают высокую точность измерения диэлектрической проницаемости только жидких диэлектриков. Как и в работах с кольцевым резонатором [7, 8], измерение диэлектрической проницаемости происходит по регистрации сдвига частоты и добротности резонансного контура, содержащего исследуемый образец, относительно пустого.

В работе [5] предложена новая конструкция микрополоскового резонатора на основе встречно-штыревой структуры (ВШС). Данная структура имеет собственный резонанс на частоте 817 МГц с максимальным пропусканием порядка  $-30$  дБ. Применение встречно-штыревой структуры рассмотрено для измерения параметров диэлектрика в работе [9]. Но такая структура применима только для образцов с диэлектрической проницаемостью выше 8. В тоже время весьма актуальным является измерение диэлектриков с малым значением диэлектрической проницаемости в верхней области диапазона СВЧ.

Целью настоящей работы явилось изучение возможности применения микрополоскового резонатора на основе встречно-штыревой структуры для измерения диэлектриков с малым значением диэлектрической проницаемости в верхней области диапазона СВЧ.

### Модель

С помощью математического моделирования рассмотрено распространение электромагнитной волны в системе, состоящей из асимметричной микрополосковой линии и диэлектрика. Изучено влияние параметров встречно-штыревого резонатора на амплитудно-частотные характеристики микрополоскового устройства на его основе, а также изучено формирование максимумов напряженности электромагнитного поля и взаимодействия данного поля с диэлектрическими средами.

Для оптимизации конструкции микрополоскового встречно-штыревого резонатора был выбран метод моментов, базовые основы которого изложены в работе [10]. Метод моментов удобен для анализа плоскостных структур, потому как дискретизацией подвергается не всё пространство, а лишь поверхности. Такой подход существенно сокращает время расчета на ЭВМ. Происходит разбиение исследуемого объекта на конечные элементы в виде треугольников. Численное моделирование было реализовано в программном комплексе Sonnet. 3D-структура представляла собой диэлектрическую подложку, нижняя сторона которой полностью металлизирована и служит экраном, а на верхней стороне подложки располагаются металлические проводники, образующие асимметричную полосковую линию передачи с электрическим разрывом в виде встречно-штыревого резонатора. Исследуемая конструкция изображена на рис. 1.

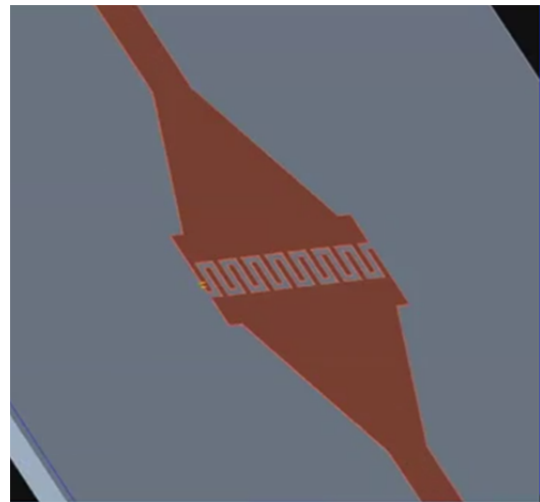


Рис. 1. Модель встречно-штыревой структуры на микрополосковой линии передачи.

Встречно-штыревой резонатор состоит из 16 одинаковых штырей, по 8 с каждой стороны. Подложка изготовлена из поликора с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 9,6$ . На основе 3D-моделирования установлено влияние геометрических размеров встречно-штыревой структуры на собственную резонансную частоту. При увеличении длины штырей резонансная частота стремится в длинноволновую область СВЧ-диапазона, при увеличении толщины штырей резонансная частота смещается

в сторону высоких частот. Для компактности устройства был выбран наименьший период штырей для работы в верхней части СВЧ-диапазона. Таким образом, при изменении длины штырей и расстояния между ними можно добиться, соответственно, увеличения или уменьшения резонансной длины волны. 3D-моделирование показало возможность установления резонанса на требуемой частоте во всём СВЧ-диапазоне.

Предложенная микрополосковая структура за счёт оптимизации её параметров обладает максимумом электромагнитного поля в области встречных штырей (см. рис. 2), поэтому данная конструкция может быть использована для измерения реальной части диэлектрической проницаемости твердых материалов на разных узкополосных участках СВЧ-диапазона.

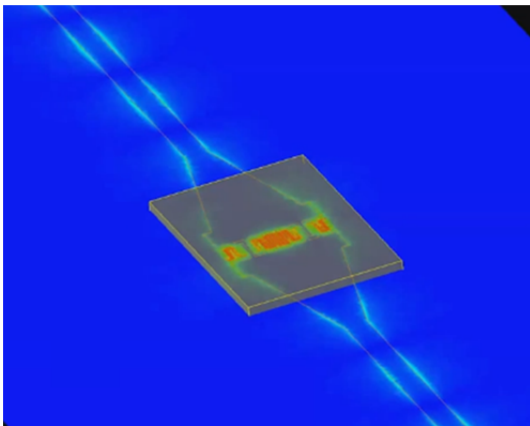


Рис. 2. Модель встречно-штыревой структуры на микрополосковой линии передачи с диэлектрическим образцом при СВЧ-сигнале.

При численном моделировании было рассмотрено влияние диэлектрика, помещённого поверх встречно-штыревого резонатора, на параметр матрицы рассеяния  $S_{21}$ . Собственный резонанс системы находился на частоте 21,3 ГГц. Было установлено соотношение сдвига резонансной частоты и диэлектрической проницаемости нагруженного на ВШС образца, что отражено на рис. 3. Полученные данные свидетельствуют о качественном изменении частоты резонанса для материала с малыми значениями диэлектрической проницаемости: при изменении значения диэлектрической проницаемости исследуемого материала происходит сдвиг по частоте полюса затухания в сторону меньших частот при  $\epsilon > 1$

и в сторону больших частот при  $\epsilon < 1$ , причём материалы с одинаковой диэлектрической проницаемостью и толщиной выше 100 мкм показывали одинаковый сдвиг по частоте.

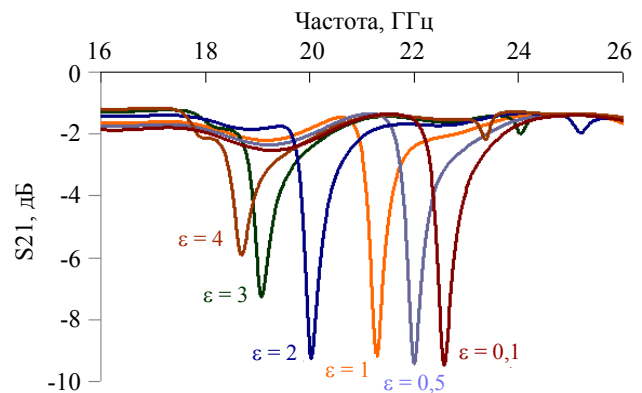


Рис. 3. Моделирование процесса измерения диэлектрической проницаемости диэлектрика в диапазоне СВЧ по коэффициенту матрицы рассеяния  $S_{21}$ .

## Эксперимент

Для проверки теоретических расчётов были изготовлены два образца микрополосковых линий с ВШС, представленные на рис. 4. Образцы имеют следующие геометрические параметры резонатора: 1)  $T$  (период) = 0,15 мм;  $l$  (длина штырей) = 5,5 мм; резонансная частота = 22,36 ГГц и 2)  $T$  (период) = 0,15 мм;  $l$  (длина штырей) = 11 мм; резонансная частота = 12,39 ГГц.

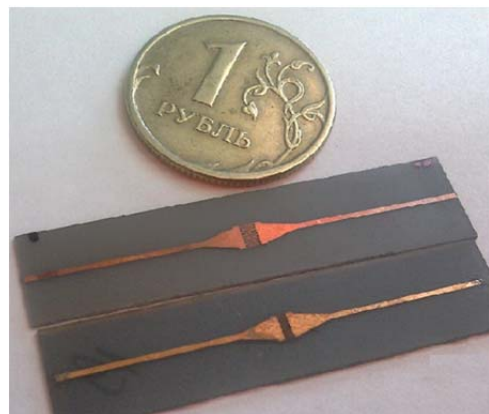


Рис. 4. Образцы микрополосковых линий для измерения диэлектрической проницаемости, резонансы которых находятся на 12,39 и 22,36 ГГц.

Экспериментальные измерения проводились на векторном анализаторе ZVA-40 фирмы Rohde&Schwarz. Для калибровки использовался комплект оригинальных мер ZV-Z129

для канала 2,92 мм. После прогрева оборудования и проведения калибровки к контактному устройству с коаксиально-микроросковыми переходами подключались образцы микроросковской линии и оценивались параметры S21 матрицы рассеяния.

Собственный резонанс образца с длиной штырей 11 мм находился на частоте 12,39 ГГц при ослаблении 11,2 дБ. В качестве материалов с известными диэлектрическими свойствами были использованы материалы с малой частотной зависимостью, а именно: тефлон толщиной 100, 200 и 400 мкм; Arlon CUCLAD 217, Arlon AD255, Arlon AD1000, ROGER RO4350, FR-4. Данные образцы поочередно помещались в область ВШС, после чего фиксировалось смещение резонансной частоты матрицы рассеяния. Образцы тефлона разной толщиной нужны были для подтверждения полученного при моделировании факта о независимости смещения частоты резонанса для толщин диэлектрика более 100 мкм.

Теоретическая и экспериментальная кривые зависимости смещения резонансной частоты от диэлектрической проницаемости приложенного образца для данной линии приведены на рис. 5. Аналогичным образом проводились измерения, представленные на рис. 6: собственный резонанс микроросковской платы с длиной штырей 5,5 мм находился на частоте 22,36 ГГц при ослаблении 12,5 дБ. Результаты 3D-моделирования и экспериментальные данные показали хорошую согласованность, которая выражалась в схожих S-параметрах матрицы рассеяния в СВЧ-диапазоне.

После сравнения теоретических расчётов и экспериментальных данных была проведена оценка диэлектрической проницаемости композитных наноматериалов на основе матриц полиэтилена низкой плотности (ПЭНП, англ. LDPE) и полиметилметакрилата (ПММА,

англ. PMMA). Были рассмотрены следующие композитные наноматериалы: наночастицы оксида железа ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) в матрице ПЭНП, наночастицы оксида цинка ( $\text{ZnO}$ ) в матрице ПЭНП, наночастицы сульфида кадмия ( $\text{CdS}$ ) в матрице ПЭНП, наночастицы тефлона, покрытые эпоксидной смолой, в матрице ПЭНП, серебряные наночастицы в матрице ПММА и серебряные наночастицы вместе с тефлоном в матрице ПММА. Значения диэлектрической проницаемости данных образцов приведены в таблице.

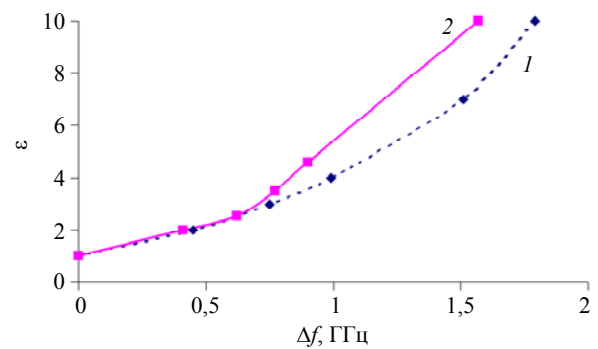


Рис. 5. Теоретическая (1) и экспериментальная (2) кривые зависимости смещения резонансной частоты от диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  приложенного образца на частоте 12,39 ГГц.

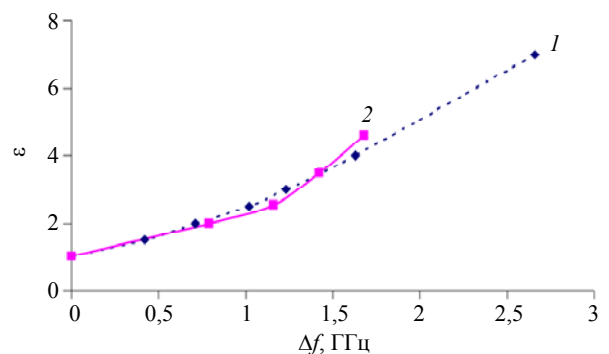


Рис. 6. Теоретическая (1) и экспериментальная (2) кривые зависимости смещения резонансной частоты от диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  приложенного образца на частоте 22,36 ГГц.

Таблица

**Значения диэлектрической проницаемости полимерных композитных наноматериалов**

Образцы	Диэлектрическая постоянная на частоте 12,39 ГГц	Диэлектрическая постоянная на частоте 22,36 ГГц
$\text{Fe}_3\text{O}_4$ in LDPE	2,3	2,2
ZnO in LDPE	2,4	2,3
CdS in LDPE	2,2	2,1
Teflon + epoxy in LDPE	3	3
Ag in PMMA	2,4	2,3
Ag + Teflon in PMMA	3,4	3,4

## Заключение

В данной работе исследована конструкция миниатюрной микрополосковой системы со встречно-штыревым резонатором. За счёт подбора оптимальных параметров эта система чувствительна к измерению материалов с диэлектрической проницаемостью близкой к диэлектрической проницаемости вакуума. Данная конструкция также позволяет измерять диэлектрическую проницаемость меньше единицы. Выводы, полученные на основе её 3D-модели, полностью подтверждаются экспериментальными данными.

Полученные в работе экспериментальные данные по измерению диэлектрической проницаемости полимерных композитных наноматериалов показали вариацию диэлектрической проницаемости для матрицы их ПЭВД от 2,1 до 3 и для матрицы из ПММА от 2,3 до 3,4.

Работа была выполнена при поддержке  
Российского Научного Фонда,  
грант № 19-72-30003.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Baker-Jarvis J. R., Janezic M. D., Riddle B. F., Johnk R. T., Holloway C. L., Geyer R. G., Grosvenor C. A. // NIST. 2005. Technical Note 1536.
2. Tereshchenko O. V., Buesink F. J. K., Leferink F. B. J. / XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium. 2011. P. 1–4.
3. Беляев Б. А., Дрокин Н. А., Шабанов В. Ф., Шенцов В. Н. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 4. С. 99.
4. Беляев Б. А., Дрокин Н. А., Лексиков А. А. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2006. Т. 49. № 9. С. 45.
5. Беляев Б. А., Сержантов А. М., Бальва Я. Ф., Лексиконов А. А., Галлеев Р. Г. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 22. С. 52.
6. Беляев Б. А., Бальва Я. Ф., Сержантов А. М., Лексиков А. А., Галеев Р. Г. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 10-3. С. 156.
7. Bahar A. A. M., Zakaria Z., Isa A. A. M., Dasril Y., Ab Rashid S. R., Alahnomi R. A. // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering. 2017. Vol. 9. No. 2-13. P. 75.
8. Low P. J., Esa F., You K. Y., Abbas Z. // Journal of Science and Technology. 2017. Vol. 9. No. 3. P. 55.
9. Зайцев Б. Д., Шихабудинов А. М., Теплых А. А., Кузнецова И. Е. Способ бесконтактного измерения диэлектрической проницаемости / Патент на изобретение RU2442179 21.04.2009.
10. Harrington R. F. Field computation by moment method. – N-Y.: Macmillan, 1968.

PACS: 77.55.–g, 78.70.Gq, 84.40.Az

## Assessment of permittivity of composite nanomaterials using a microstrip interdigital resonator in the super high frequency range

*S. Yu. Molchanov<sup>1</sup>, N. M. Ushakov<sup>2</sup>, and A. N. Litvinenko<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences  
2 Academician Ossipyan st., Chernogolovka, Moscow District, 142432, Russia  
E-mail: canishe@yandex.ru

<sup>2</sup> Saratov Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics,  
Russian Academy of Sciences  
38 Zelenaya st., Saratov, 410019, Russia  
E-mail: nmu@bk.ru

<sup>3</sup> Saratov State University  
83 Astrakhanskaya st., Saratov, 410012, Russia

Received August 19, 2019

*Mathematical modeling of the microstrip line structure with a microstrip interdigital resonator has been done in the microwave range. Optimal settings in the short-wave region of*

***the microwave range were chosen. Electrical parameters of this interdigital structure with thick-film samples of materials with dielectric constant from 0.1 to 10 were described. Determining dielectric constant of composite nanomaterials in the microwave range using interdigital structure was shown. Microstrip samples were fabricated and measurements of the real part of the dielectric constant of a polymer composite nanomaterial based on matrices of the low-density polyethylene and polymethylmethacrylate were carried out.***

***Keywords:*** microwave band, composite nanomaterial, dielectric constant, interdigital resonator, microstrip line.

#### REFERENCES

1. J. R. Baker-Jarvis, M. D. Janezic, B. F. Riddle, R. T. Johnk, C. L. Holloway, R. G. Geyer, and C. A. Grosvenor, NIST. 2005. Technical Note 1536.
2. O. V. Tereshchenko, F. J. K. Buesink, and F. B. J. Leferink, in *Proc. XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium*. (2011). P. 1–4.
3. B. A. Belyaev, N. A. Drokin, V. F. Shabanov, and V. N. Shepov, *Technical Physics* **47** (4), 470 (2002). DOI: 10.1134/1.1470597
4. B. A. Belyaev, N. A. Drokin, and A. A. Leksikov, *Russian Physics Journal* **49** (9), 952 (2006). DOI: 10.1007/s11182-006-0208-4
5. B. A. Belyaev, A. M. Serzhantov, Y. F. Bal'va, A. A. Leksikov, and R. G. Galeev, *Technical Physics Letters* **40** (11), 1010 (2014). DOI: 10.1134/S1063785014110194.
6. B. A. Belyaev, Y. F. Bal'va, A. M. Serzhantov, A. A. Leksikov, and R. G. Galeev, *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika*. **58** (10-3), 156 (2015).
7. A. A. M. Bahar, Z. Zakaria, A. A. M. Isa, Y. Dasril, S. R. Ab Rashid, and R. A. Alahnomi, *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering* **9** (2–13), 75 (2017).
8. P. J. Low, F. Esa, K. Y. You, and Z. Abbas, *Journal of Science and Technology* **9** (3), 55 (2017).
9. B. D. Zaycev, A. M. Shihabudinov, A. A. Teplih, and I. E. Kuznecova, Patent RUS. 2009. No. 2442179.
10. R. F. Harrington, *Field computation by moment method* (N-Y.: Macmillan. 1968).