

УДК 621.317.335.3

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СТЕРЖЕНЬКА И ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗАТОРА ЦЕПЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ

Н.А. ПЕВНЕВА, А.Л. ГУРСКИЙ, А.М. КОСТРИКИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 26 ноября 2018*

**Аннотация.** Рассмотрен способ, в котором для определения диэлектрической проницаемости используется метод цилиндрического стерженька совместно с векторным анализатором цепей. Разработан алгоритм определения диэлектрической проницаемости. Исследованы зависимости диэлектрической проницаемости текстолита и фторопласта от частоты в диапазоне 25,95–37,5 ГГц.

*Ключевые слова:* цилиндрический стерженек, диэлектрическая проницаемость, коэффициент отражения, измерительная ячейка, векторный анализатор цепей.

**Abstract.** It's considered the way in which the method of a cylindrical rod together with a vector network analyzer is used to determine the dielectric constant. The algorithm for determining the dielectric constant is developed. Dependences of the dielectric constant of textolite and fluoroplastic on the frequency in the range 25.95–37.5 GHz are investigated.

*Keywords:* cylindrical rod, dielectric constant, reflection coefficient, measuring cell, vector network analyzer.

**Doklady BGUIR. 2019, Vol. 119, No. 1, pp. 56-61**

**Using the cylindrical rod method and a vector network analyzer  
to determine the dielectric permittivity of materials on microwave range**

**N.A. Pevneva, A.L. Gurskii, A.M. Kostrikin**

### Введение

В машиностроении, горнодобывающей промышленности, радиосвязи, радиолокации, радионавигации, радиоуправлении, радиопротиводействии, радиоастрономии, радиометрии, атмосферной метеорологии, медицине, средствах вычислительной техники и телекоммуникаций создание новых материалов с заданными свойствами требует высокоточных методов контроля и дальнейшего мониторинга свойств этих материалов. Одним из важнейших свойств материалов является их диэлектрическая проницаемость.

Повышение быстродействия систем телекоммуникаций, миниатюризация изделий микроэлектроники, ряд задач создания покрытий с заданными свойствами требуют знания значений диэлектрической проницаемости в СВЧ диапазоне. Однако в настоящее время точные и надежные бесконтактные способы измерения диэлектрической проницаемости материалов в широком интервале частот СВЧ диапазона разработаны в недостаточной степени.

Анализ показывает, что существующие до настоящего времени способы измерения диэлектрической проницаемости материалов при использовании измерительных линий [1] и скалярных анализаторов цепей [2] не позволяют автоматизировать процесс измерения.

В настоящее время литературные данные по значениям диэлектрической проницаемости и характеру их зависимости от частоты в СВЧ диапазоне либо неполны, либо вообще отсутствуют для многих материалов, как известных, так и вновь создаваемых.

В данной работе предлагается новый способ, позволяющий не только измерять численные значения, но и осуществлять мониторинг диэлектрических свойств материалов в СВЧ диапазоне в реальном масштабе времени. Таким образом, целью данной работы является создание автоматизированного способа измерения диэлектрической проницаемости в СВЧ диапазоне с более высокой точностью при одновременном снижении трудоемкости и стоимости по сравнению с представленными в [3, 4] способами.

### Описание способа измерения

Для определения диэлектрических свойств материалов в СВЧ диапазоне широко применяется метод частичного заполнения сечения волновода [3, 4]. Одной из его модификаций является метод цилиндрического стерженька. Он был предложен Ле Бо и Ле Монтанье [3] и детально проанализирован Ю.П. Радиным [4].

Предлагаемый метод включает определение комплексной диэлектрической проницаемости твердого и жидкого диэлектрика посредством определения его эквивалентной нормированной проводимости, при этом в качестве измерительной ячейки используется закороченная волноводная камера (рис. 1, а) с помещенным в нее образцом исследуемого диэлектрика (рис. 1, б).

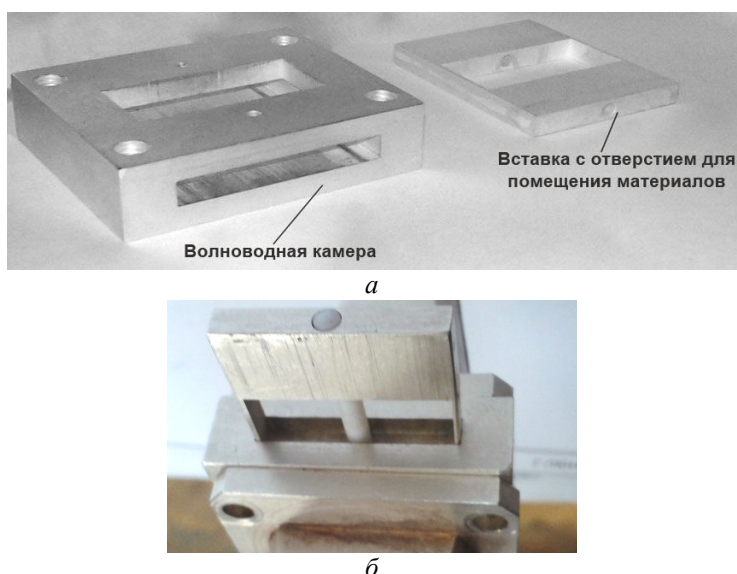


Рис. 1. Измерительная ячейка в разобранном (а) и в собранном (б) виде для диапазона частот 25,95–37,5 ГГц

Метод заключается в определении импеданса в короткозамкнутом волноводе. Шунтирующий импеданс  $Z$  включен параллельно импедансу  $Z_0$  пустого участка волновода между образцом и короткозамыкателем. Учитывая, что адмитансы, включенные параллельно, суммируются, то соответствующий адмитанс  $Y$  можно получить как разницу результатов измерений адмитанса  $Y_n$  с исследуемым образцом и адмитанса  $Y_0$  без исследуемого образца:

$$Y = Y_n - Y_0. \quad (1)$$

Согласно общей волноводной теории можно найти адмитанс в любом месте волновода исходя из поведения стоячей волны перед этим местом. Тогда для измерений с исследуемым образцом и без него справедливы формулы:

$$Y_n = \frac{1 - \Gamma_n}{1 + \Gamma_n}; \quad Y_0 = \frac{1 - \Gamma_0}{1 + \Gamma_0}, \quad (2)$$

где  $\Gamma_n$  и  $\Gamma_0$  – измеренные комплексные коэффициенты отражения с исследуемым образцом и без него соответственно.

Значения  $\Gamma_n$  и  $\Gamma_0$  находятся из формул:

$$\Gamma_n = \frac{1 - n_n}{1 + n_n} e^{j2\alpha_n}; \quad (3)$$

$$\Gamma_0 = \frac{1 - n_0}{1 + n_0} e^{j2\alpha_0}, \quad (4)$$

где  $n_n = \frac{1 - 10^{|S_n|/20}}{1 + 10^{|S_n|/20}}$ ;  $n_0 = \frac{1 - 10^{|S_0|/20}}{1 + 10^{|S_0|/20}}$ ;  $|S_n|$ ,  $|S_0|$  – результаты измерений модулей коэффициентов отражения с исследуемым образцом и без исследуемого образца, дБ;

$$\alpha_n = -\pi/2 + \pi l / \lambda_v - \frac{\varphi_n}{2} = -\pi/2 + \pi l \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2} / \lambda_0 - \frac{\varphi_n}{2};$$

$$\alpha_0 = -\pi/2 + \pi l / \lambda_v - \frac{\varphi_0}{2} = -\pi/2 + \pi l \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2} / \lambda_0 - \frac{\varphi_0}{2};$$

$\varphi_n$ ,  $\varphi_0$  – результаты измерений фазы коэффициентов отражения с исследуемым образцом и без исследуемого образца;  $l$  – расстояние от исследуемого образца до плоскости подключения короткозамыкателя, м;  $\lambda_0$ ,  $\lambda_v$  – длина волны СВЧ излучения в свободном пространстве и в волноводе соответственно, м.

Для измерения модулей  $|S_n|$ ,  $|S_0|$  и фаз  $\varphi_n$ ,  $\varphi_0$  коэффициентов отражения используется векторный анализатор цепей. Структурная схема установки, собираемой при измерениях, приведена на рис. 2 и состоит из векторного анализатора цепей (ВАЦ), волноводной камеры (ВК), короткозамыкателя (КЗ) и персонального компьютера (ПК).

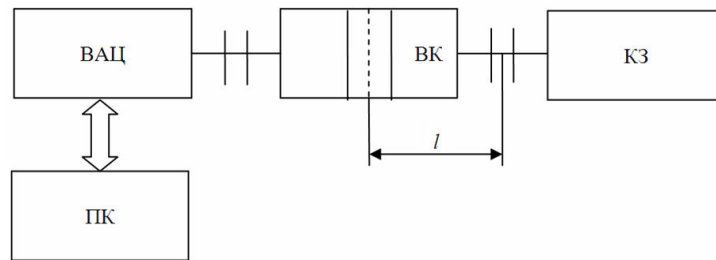


Рис. 2. Структурная схема установки с использованием векторного анализатора цепей

Калибровка используемого ВАЦ [5] осуществляется при использовании только КЗ. Это достигается за счет применения в измерительном СВЧ тракте ВАЦ фазовой манипуляции опорного СВЧ сигнала, что позволяет получить восемь комбинаций фазового сдвига в пределах от 0 до минус  $\pi/2$ . Для этого в ВАЦ используется дискретный фазовращатель типа периодически нагруженной линии передачи, в котором содержатся три ячейки, соединенные последовательно. При этом в каждой ячейке в волноводно-щелевую линию включены последовательно  $p-i-n$  диоды, расположенные на расстоянии  $\lambda_{вср}/4$  друг от друга, где  $\lambda_{вср}$  – длина волны в волноводе при среднем значении диапазона перестройки частоты. Переключение  $p-i-n$  диодов из закрытого состояния в открытое обеспечивает изменение собственной реактивности  $p-i-n$  диодов, которая соответствует создаваемому фазовому сдвигу. Конструктивные элементы выбраны таким образом, чтобы при среднем значении диапазона перестройки частоты сдвиг фаз при переключениях соответствовал приблизительно минус  $\pi/6$ . При этом благодаря тому, что отдельные ячейки дискретного фазовращателя коммутируются независимо друг от друга, в ВАЦ обеспечивается восемь возможных значений фазового сдвига. Благодаря применению такой фазовой манипуляции и специального алгоритма обработки измерительной информации появляется возможность использовать при калибровке только КЗ (это соответствует структуре короткозамкнутой волноводной камеры) без применения дорогостоящих эталонов – мер фазового сдвига.

В адмитансе  $Y$  можно выделить действительную  $G$  и мнимую  $B$  части:

$$G = \frac{n_n (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_n)}{n_n^2 + \operatorname{tg}^2 \alpha_n} - \frac{n_0 (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_0)}{n_0^2 + \operatorname{tg}^2 \alpha_0}, \quad (5)$$

$$B = \frac{(1 - n_n^2) \operatorname{tg} \alpha_n}{n_n^2 + \operatorname{tg}^2 \alpha_n} - \frac{(1 - n_0^2) \operatorname{tg} \alpha_0}{n_0^2 + \operatorname{tg}^2 \alpha_0}. \quad (6)$$

Измерения проводятся в два этапа. На первом этапе измеряют модули и фазы коэффициентов отражения в диапазоне перестройки частоты при незаполненном материалом стерженьке –  $|S_0|$  и  $\varphi_0$ . На втором этапе измеряют модули и фазы коэффициентов отражения в диапазоне перестройки частоты при заполненном материалом стерженьке –  $|S_n|$  и  $\varphi_n$ . Расстояние между стерженьком и выходным фланцем волноводной камеры известно по результатам метрологической аттестации с высокой степенью точности. Плоскость короткого замыкания может перемещаться с помощью микрометрического винта короткозамыкателя, и она устанавливается в положения, чтобы интервал между стерженьком и плоскостью короткого замыкания был равен

$$l = \frac{n}{2} \cdot \lambda_{\text{всп}}, \quad (7)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$

Это обеспечивает наибольшую чувствительность измерений.

Комплексная диэлектрическая проницаемость и ее составляющие рассчитываются по формулам:

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''; \quad (8)$$

$$\varepsilon' = 1 + \left[ 2 \left( \frac{\lambda_0}{\pi d} \right)^2 + 0,5 \right] \cdot \frac{u}{u^2 + v^2}; \quad (9)$$

$$\varepsilon'' = \left[ 2 \left( \frac{\lambda_0}{\pi d} \right)^2 + 0,5 \right] \cdot \frac{v}{u^2 + v^2}, \quad (10)$$

где  $\varepsilon$  – комплексная диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  – действительная и мнимая составляющая диэлектрической проницаемости соответственно;  $d$  – диаметр стерженька;  $u$  и  $v$  – переменные, введенные для упрощения выражения, рассчитываемые по формулам:

$$u = 2 \sum_{n=3,5,7,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{\sqrt{n^2 - (2a/\lambda)^2}} - \frac{1}{n} \right] - 1,75 + \ln 4a/\pi d + \frac{2\lambda_{\text{в}}}{a} \frac{B}{B^2 + G^2}; \quad (11)$$

$$v = \frac{2\lambda_{\text{в}}}{a} \frac{B}{B^2 + G^2}, \quad (12)$$

где  $a$  – размер широкой стенки волновода.

Предлагаемый метод измерений позволяет не проводить измерение токов и, соответственно, исключить из установки: вентиль; зонд отбора мощности; микрометрический винт; термостатирующую рубашку; термостат; фильтр СВЧ; частотомер. За счет упрощения измерительной установки уменьшается погрешность измерения, поскольку исключаются несколько инструментальных погрешностей.

Таким образом, за счет упрощения измерительной установки (исключаются дополнительные источники погрешности) и расчета эквивалентной нормированной проводимости непосредственно из значений КСВН возрастает точность проводимых измерений.

Дополнительным преимуществом предлагаемого способа измерений является снижение стоимости используемого оборудования и уменьшение трудозатрат на проведение измерений, поскольку значительно облегчается процесс проведения измерений и обработки полученных результатов.

Для векторного анализатора цепей было разработано специальное программное обеспечение «MeasurementCells», позволяющее производить расчеты диэлектрической проницаемости автоматически во время измерения  $S$ -параметров образцов.

С помощью метода цилиндрического стерженька с использованием ВАЦ были проведены исследования диэлектрических свойств фторопласта и текстолита, поскольку эти

материалы широко применяются в качестве конструкционных в радиоэлектронной технике.

Расчитанные по данным измерений зависимости диэлектрической проницаемости от частоты для фторопласта и текстолита приведены на рис. 3 и 4 соответственно. Значение расширенной неопределенности составило для фторопласта 1,2 %, для текстолита – 2,2 %. Таким образом, можно говорить о том, что разработанная методика работоспособна и может быть использована в дальнейших исследованиях свойств различных материалов.

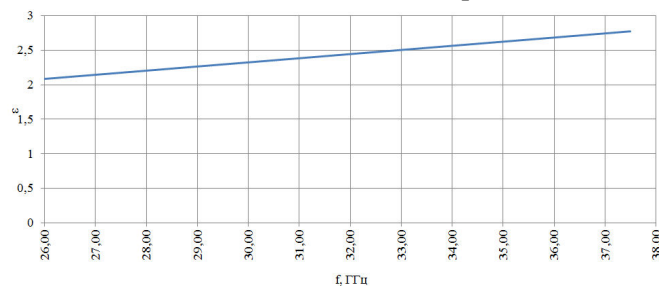


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты для фторопласта

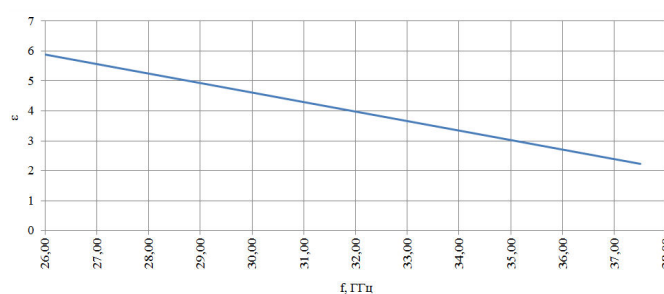


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты для текстолита

### Заключение

Рассмотрен модифицированный метод «цилиндрического стерженька» с использованием векторного анализатора цепей. Разработан алгоритм определения диэлектрической проницаемости. На основе измерений амплитуды и фазы коэффициента отражения для текстолита и фторопласта получены зависимости диэлектрической проницаемости этих материалов от частоты в диапазоне 25,95–37,5 ГГц. Значение расширенной неопределенности составило для фторопласта 1,2 %, для текстолита – 2,2 %, что свидетельствует о работоспособности разработанной методики и ее применимости в исследованиях свойств различных материалов.

### Список литературы

1. Харвей А.Ф. Техника сверхвысоких частот. Т. 1. М.: Сов. радио, 1965. 775 с.
2. Handjojo L.F. Sensitivity analysis of two-port transmission line technique for dielectric property measurement using dielectric plugs. Colorado State University, 1999.
3. Le Bot J., Le Montagner S. Methode de mesure de la constante dielectrique comptes rendus // Comptes Rendus. 1953. Vol. 236, № 5. P. 469.
4. Радин Ю.П. Об одном методе измерения диэлектрической проницаемости в сантиметровом диапазоне // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1958. Т. 1, № 5–6. С. 177–179.
5. Способ формирования напряжений, несущих информацию о квадратурных составляющих S-параметров СВЧ устройств: пат. 22074 Респ. Беларусь / А.В. Гусинский, А.М. Кострикин, Д.А. Кондрашов, А.В. Сайков, В.П. Липатников, Н.А. Певнева; дата публ.: 30.08.2018.

### References

1. Harvej A.F. Tehnika sverhvysokih chastot. T. 1. M.: Sov. radio, 1965. 775 s. (in Russ.)
2. Handjojo L.F. Sensitivity analysis of two-port transmission line technique for dielectric property measurement using dielectric plugs. Colorado State University, 1999.

3. Le Bot J., Le Montagner S. Methode de mesure de la constante dielectrique comptes rendus // Comptes Rendus. 1953. Vol. 236, № 5. P. 469.
4. Radin Ju.P. Ob odnom metode izmerenija dijelektricheskoj pronicaemosti v santimetrovom diapazone // Izv. VUZov. Radiofizika. 1958. T. 1, № 5–6. S. 177–179. (in Russ.)
5. Sposob formirovaniya naprjazhenij, nesushhih informaciju o kvadraturnyh sostavljajushhih S-parametrov SVCh ustrojstv: pat. 22074 Resp. Belarus' / A.V. Gusinskij, A.M. Kostrikin, D.A. Kondrashov, A.V. Sajkov, V.P. Lipatnikov, N.A. Pevneva; data publ.: 30.08.2018. (in Russ.)

#### **Сведения об авторах**

Певнева Н.А., научный сотрудник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гурский А.Л., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кострикин А.М., к.т.н., заместитель директора Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### **Адрес для корреспонденции**

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный  
университет информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17-293-20-92;  
e-mail: saphir-n@mail.ru  
Певнева Наталья Алексеевна

#### **Information about the authors**

Pevneva N.A., researcher of Center 1.9 of R&D department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Gurskii AL, D.Sci, professor, professor of information protection department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Kostrikin A.M., PhD, deputy director of Center 1.9 of R&D department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

#### **Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6,  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. +375-17-294-55-08;  
e-mail: saphir-n@mail.ru  
Pevneva Natalia Alekseevna