

Расчет и измерение диэлектрических параметров керамических и сегнетоэлектрических материалов в диапазоне СВЧ

В. С. Севериков[✉], Фам Конг Че, В. И. Мельник

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] severva3@gmail.com

Аннотация

Введение. Определение электрофизических параметров линейных и нелинейных диэлектрических материалов для применения в технике СВЧ является важной задачей. Линейные диэлектрики используют как основу для подложек СВЧ-схем, так и в качестве объемных элементов для построения частотно-избирательных или резонансных структур, которые работают в широком температурном диапазоне. Поэтому вопрос стабилизации электрических параметров таких структур в условиях изменения температуры актуален. Его можно решить, используя многослойную комбинацию диэлектриков как с линейными, так и с нелинейными свойствами. Нелинейные свойства, которыми обладают сегнетоэлектрики, находят применение в функциональных узлах с электрической перестройкой частотных и фазовых характеристик. Важным является не только определение относительной диэлектрической проницаемости материала, но и коэффициента управления в ВЧ–СВЧ-диапазонах длин волн.

Цель работы. Построение расчетных математических моделей для слоистых объемных и пленочных структур и определение относительной диэлектрической проницаемости линейных и нелинейных диэлектриков в диапазоне СВЧ.

Материалы и методы. Вычислительные математические модели для анализа сложных слоистых структур построены на базе уравнений Максвелла и метода Галеркина с применением граничных условий для касательных и нормальных компонент электромагнитного поля.

Результаты. Выполнен электродинамический анализ двухслойного объемного дискового резонатора и получены результаты расчета резонансной частоты. Проведен численный анализ дисперсионных характеристик многоэлектродной линии передачи, и по результатам измерений многоэлектродного полуволнового резонатора с сегнетоэлектрической пленкой получено значение ее относительной диэлектрической проницаемости и коэффициента управления.

Заключение. Созданные математические модели и проведенный эксперимент позволили численно оценить свойства линейных и нелинейных диэлектрических объемных и пленочных материалов в СВЧ-диапазоне.

Ключевые слова: слоистый объемный диэлектрический резонатор, сегнетоэлектрические резонансные структуры, линейные, нелинейные диэлектрики

Для цитирования: Севериков В. С., Фам Конг Че, Мельник В. И. Расчет и измерение диэлектрических параметров керамических и сегнетоэлектрических материалов в диапазоне СВЧ // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 6. С. 64–73. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-6-64-73

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы благодарят руководство ОАО "Завод Магнетон" (Санкт-Петербург) за предоставление технологической и измерительной базы для проведения исследований свойств диэлектрических материалов.

Статья поступила в редакцию 07.09.2023; принята к публикации после рецензирования 05.12.2023; опубликована онлайн 29.12.2023

Calculation and Measurement of Dielectric Parameters of Ceramic and Ferroelectric Materials in the Microwave Range

Vasily S. Severikov✉, Fam Kong Che, Vyacheslav I. Melnik

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉severva3@gmail.com

Abstract

Introduction. Determination of the electrophysical parameters of linear and nonlinear dielectric materials for use in microwave technology represents an important direction. Linear dielectrics are used as a basis for the substrates of microwave circuits, as well as volumetric elements for the construction of frequency selective or resonant structures that operate across a wide temperature range. Therefore, the issue of stabilizing the electrical parameters of such structures from temperature influences appears relevant. A possible solution lies in the use of a multilayer combination of dielectrics, both with linear and nonlinear properties. Due to their nonlinear properties, ferroelectrics find application in functional units with an electrical rearrangement of frequency and phase characteristics. Therefore, it is important to determine not only the relative permittivity of the material, but also the control coefficient in the RF–microwave wavelength ranges.

Aim. Construction of computational mathematical models for layered bulk and film structures to determine the relative permittivity of linear and nonlinear dielectrics in the ultrahigh frequency range.

Materials and methods. The construction of computational mathematical models for the analysis of complex layered structures was carried out on the basis of Maxwell's equations and the Galerkin method using boundary conditions for electromagnetic field components.

Results. An electrodynamic analysis of a two-layer volumetric disk resonator was performed, and numerical results of calculating the resonant frequency were obtained. A numerical analysis of a multielectrode half-wave resonator with a ferroelectric film (FEF) was carried out.

Conclusion. The mathematical models created and the experiment performed made it possible to numerically evaluate the properties of linear and nonlinear dielectric bulk and film materials in the microwave range.

Keywords: layered volumetric dielectric resonator, ferroelectric resonant structures, linear, nonlinear dielectrics

For citation: Severikov V. S., Fam Kong Che, Melnik V. I. Calculation and Measurement of Dielectric Parameters of Ceramic and Ferroelectric Materials in the Microwave Range. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 6, pp. 64–73. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-6-64-73

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements. The authors thank the management of JSC "Magnetron Plant" (St Petersburg) for providing a technological and measuring base for conducting research on the properties of dielectric materials.

Submitted 07.09.2023; accepted 05.12.2023; published online 29.12.2023

Введение. В технике сверхвысоких частот широкое применение находят линейные и нелинейные диэлектрические материалы, на основе которых создаются элементы и узлы различного функционального назначения. Линейные диэлектрики широко используются в качестве конструкционных материалов – диэлектрических подложек, на поверхностях которых формируется топология металлических электродов из металлов с высокой удельной электропроводностью. Также линейные диэлектри-

ки являются основой объемных резонаторов в различных конструктивных исполнениях [1–5], используемых в цепях генерации частоты. Обладая высокой добротностью, объемные резонаторы позволяют строить многорезонансные СВЧ-фильтры с различными видами амплитудно-частотной характеристики [6]. Нелинейные диэлектрики, к которым относятся сегнетоэлектрики [7–9], обладают спонтанной поляризацией, что позволяет применять их в качестве материалов, на основе которых возможно постро-

ение устройств с электрически перестраиваемыми частотными параметрами. Сегнетоэлектрики обладают свойством изменять свою относительную диэлектрическую проницаемость ε в зависимости от напряженности внешнего управляющего электрического поля. В миллиметровом диапазоне длин волн сегнетоэлектрические материалы, относительная диэлектрическая проницаемость которых для объемных образцов может достигать нескольких десятков тысяч, применяются в виде тонких пленок, сформированных на диэлектрической подложке. При толщине сегнетоэлектрической пленки (СЭП) около 1 мкм в зависимости от химического состава пленки ее относительная диэлектрическая проницаемость ε находится в интервале от 100 до 2500. Таким образом, для оценки свойств керамических линейных и нелинейных материалов в СВЧ-диапазоне возникает необходимость определения их диэлектрической проницаемости, а для сегнетоэлектриков – еще и коэффициента нелинейности (зависимости ε от внешнего управляющего электрического поля).

Определение резонансной частоты многослойного дискового резонатора.

Постановка задачи и ее решение. Объемный слоистый диэлектрический резонатор и его поперечное сечение в цилиндрических координатах (r, φ, z) представлены на рис. 1.

Объемный резонатор состоит из частичных областей с различающимися относительными диэлектрическими проницаемостями ε_1 и ε_2 .

Параллельные поверхности резонатора "затянуты" электрическими стенками, а внешняя радиальная поверхность закрыта магнитной стенкой. Рассмотрим резонатор, у которого высота d намного меньше длины волны в свободном пространстве λ ($d \ll \lambda$). Данная структура обеспечивает одномодовый режим с основным типом волны $E(0,0,E_z)$; $H(0,H_\varphi,0)$. Цилиндрическая волна [10] от центра резонатора распространяется с зависимостью от координаты r в виде $e^{(-jkr)}$, где $k = 2\pi f \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon}$; f – частота; $\varepsilon = \varepsilon_1$ при $r \leq r_1$; $\varepsilon = \varepsilon_2$ при $r_1 < r \leq r_2$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-10}$ Гн/мм; $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-15}$ Ф/мм.

В цилиндрических координатах из уравнений Максвелла при $E_r = 0$ и $H_r = 0$ вытекают соотношения между поперечными компонентами электрического поля E_z, E_φ и H_z, H_φ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial r} &= jkZ_0 \left[H_\varphi - \frac{1}{k^2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \varphi \partial z} - \frac{\partial^2 H_\varphi}{\partial z^2} \right) \right]; \\ \frac{1}{r} \frac{\partial (rE_\varphi)}{\partial r} &= \\ &= -jkZ_0 \left[H_z + \frac{1}{k^2} \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \varphi^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 H_\varphi}{\partial z \partial \varphi} \right) \right]; \\ \frac{\partial H_z}{\partial r} &= -j \frac{k}{Z_0} \left[E_\varphi - \frac{1}{k^2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi \partial z} - \frac{\partial^2 E_\varphi}{\partial z^2} \right) \right]; \end{aligned} \quad (1)$$

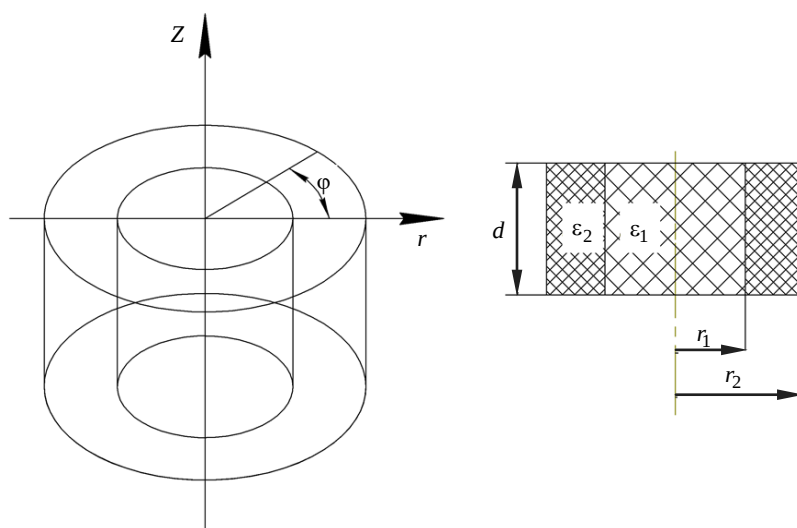


Рис. 1. Поперечное сечение диэлектрического слоистого резонатора в цилиндрических координатах

Fig. 1. Cross section of a dielectric layered resonator

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (r H_{\varphi})}{\partial r} = j \frac{k}{Z_0} \left[E_z + \frac{1}{k^2} \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 E_{\varphi}}{\partial z \partial \varphi} \right) \right],$$

где $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi$ Ом.

Так как $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$; $\frac{\partial}{\partial z} = 0$, из (1) запишем связь между поперечными компонентами E_z , H_{φ} основного типа волны

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial r} &= j k Z_0 H_{\varphi}; \\ \frac{1}{r} \frac{\partial (r H_{\varphi})}{\partial r} &= j \frac{k}{Z_0} E_z. \end{aligned} \quad (2)$$

Из уравнений (2) для компоненты E_z найдем

$$-j \frac{1}{k Z_0 r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E_z}{\partial r} \right) = j \frac{k}{Z_0} E_z,$$

откуда следует уравнение Бесселя

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E_z}{\partial r} \right) + k^2 E_z = 0. \quad (3)$$

Линейная комбинация функций Бесселя $J_n(kr)$ и Неймана $N_n(kr)$, где $n=0,1,\dots,N$, представляет общее решение уравнения Бесселя [11, 12]. Таким образом, для основного типа волны $n=0$ и, следовательно, решение уравнения (3) можно представить в виде

$$E_z = A J_0(kr) + B N_0(kr), \quad (4)$$

где A, B – произвольные коэффициенты.

Функция Неймана $N_n(kr)$ при $r \rightarrow 0$ стремится к бесконечности ($N_0(kr) \rightarrow \infty$), следовательно, для решения уравнения (4) $B=0$ и для первой области (4) имеет вид

$$E_z^1 = A_1 J_0(k_1 r), \quad (5)$$

где $k_1 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon_1}$.

Из (2) для компоненты магнитного поля H_{φ} в первой области получим

$$H_{\varphi}^{(1)} = -j \frac{1}{k Z_0^{(1)}} A_1 J_1(k_1 r), \quad (6)$$

где $Z_0^{(1)} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_1}}$.

Для второй области при $r_1 \leq r \leq r_2$ поперечные компоненты поля $E_z^{(2)}$ и $H_{\varphi}^{(2)}$ из (5) и (6) запишем в виде

$$\begin{aligned} E_z^{(2)} &= A_2 J_0(k_2 r) + B_2 N_0(k_2 r); \\ H_{\varphi}^{(2)} &= j \frac{1}{k Z_0^{(2)}} [A_2 J_1(k_2 r) + B_2 N_1(k_2 r)], \end{aligned} \quad (7)$$

где $k_2 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon_2}$; $Z_0^{(2)} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_2}}$.

Сшивание поперечных касательных составляющих компонент поля (5)–(7) на границе раздела двух диэлектрических сред при $r=r_1$ дает систему уравнений относительно коэффициентов A_1, B_1 и A_2, B_2 :

$$\begin{cases} A_1 J_0(k_1 r_1) - A_2 J_0(k_2 r_1) - B_1 N_0(k_2 r_1) = 0; \\ A_1 J_1(k_1 r_1) - \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} A_2 J_1(k_2 r_1) - \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} B_2 N_1(k_2 r_1) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Принимая во внимание, что боковая поверхность является магнитной стенкой и на ее поверхности для электрического поля выполняется режим холостого хода, $E = \text{тах}$, а $H = 0$, т. е. при $r=r_1$ $H_y^{(2)} = 0$. Для случая, когда $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$, т. е. диэлектрическое заполнение резонатора однородно, уравнение для H_{φ} при $r=r_2$ принимает вид

$$H_{\varphi} = -j \frac{1}{Z_0} A J_1(kr) = 0.$$

Следовательно, резонансная частота такого резонатора будет определена из уравнения $J_1(2\pi f_0 \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon} r) = 0$:

$$f_p = \frac{3.83c}{2\pi r \sqrt{\varepsilon}},$$

где $c = 3 \cdot 10^{11}$ мм/с; $r=r_2$ – внешний радиус резонатора; ε – относительная диэлектрическая проницаемость резонатора.

С учетом того, что во второй среде $H_{\phi}^{(2)} = 0$, из (8) найдем связь между произвольными постоянными A_2, B_2 :

$$B_2 = -A_2 \frac{J_1(k_2 R_2)}{N_1(k_2 R_2)}. \quad (9)$$

Подставив (9) в (8), запишем однородную систему уравнений для неизвестных коэффициентов A_1 и A_2 :

$$\begin{cases} A_1 J_0(k_1 r_1) - \\ - A_2 \left[J_0(k_2 r_1) - J_1(k_2 r_2) \frac{N_0(k_2 r_1)}{N_1(k_2 r_2)} \right] = 0; \\ A_1 J_1(k_1 r_1) - \\ - \left\{ A_2 \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \left[J_1(k_2 r_1) - J_1(k_2 r_2) \frac{N_0(k_2 r_1)}{N_1(k_2 r_2)} \right] \right\} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Приравняв к нулю систему уравнений (10), получаем возможность определить резонансную частоту резонатора с различающимися значениями относительной диэлектрической проницаемости частичных областей.

На рис. 2 представлены графики зависимости резонансной частоты резонаторов с различными геометрическими размерами от значений диэлектрического заполнения $\varepsilon_2, \varepsilon_1$ и внутреннего радиуса первой частичной области. Видно, что при малом изменении радиуса внутреннего диэлектрического заполнения и низком значении относительной диэлектрической проницаемости перестройка частоты резонатора незначительна. Однако при увеличении диаметра внутренней области резонансная

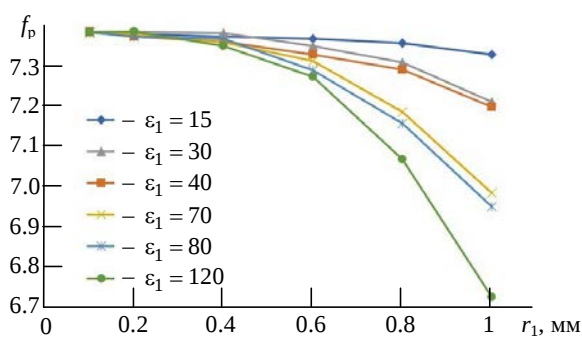


Рис. 2. Зависимости резонансной частоты дискового двухслойного резонатора от радиуса r_1 и ε_1 при $r_2 = 5$ мм, $\varepsilon_2 = 10$

Fig. 2. Dependence of the resonant frequency of a double-layer disk resonator on the radius r_1 and ε_1 at $r_2 = 5$ mm, $\varepsilon_2 = 10$

частота существенно снижается. Следует отметить, что внешний слой резонатора лучше выбирать с более высоким значением относительной диэлектрической проницаемости, чем внутреннее. Тем самым обеспечивается условие холостого хода для электрического поля на границе боковая поверхность – свободное пространство.

В практических задачах возникает необходимость учета влияния на резонансную частоту дискового резонатора изменения относительной диэлектрической проницаемости слоев в зависимости от температуры [3]. Тогда система уравнений (10) может быть записана в виде параметрической системы, учитывающей влияние температурных коэффициентов диэлектрической проницаемости слоев, которые в определенной комбинации позволят обеспечить "нулевое" изменение резонансной частоты при изменении температуры. Представленную расчетную модель для двухслойной структуры можно расширить для произвольного числа слоев, выполняя сшивание касательных составляющих на границах раздела и записав систему уравнений относительно неизвестных коэффициентов. Таким образом, появляется возможность подбором материалов как линейных, так и нелинейных диэлектриков с различными значениями диэлектрической проницаемости слоев и их толщин обеспечить стабилизацию частоты в широком температурном интервале.

Определение свойств СЭП в СВЧ-диапазоне. Постановка задачи и ее решение. Для оценки электрофизических свойств сегнетоэлектрических пленок в СВЧ-диапазоне, относительной диэлектрической проницаемости ε , коэффициента перестройки относительной диэлектрической проницаемости в зависимости от управляющего электрического поля рассмотрим многослойную структуру, на основе которой сформирован полуволновой резонатор, на электроды которого подается управляющее напряжение. На рис. 3, а представлен волновод, по центру которого располагается диэлектрическая подложка с полуволновым многоэлектродным резонатором. Поперечное сечение резонатора с СЭП показано на рис. 3, б.

Такую линию будем рассматривать как щелевую линию [13–15]. Как известно, щелевая мода имеет гибридный характер, следовательно, ее

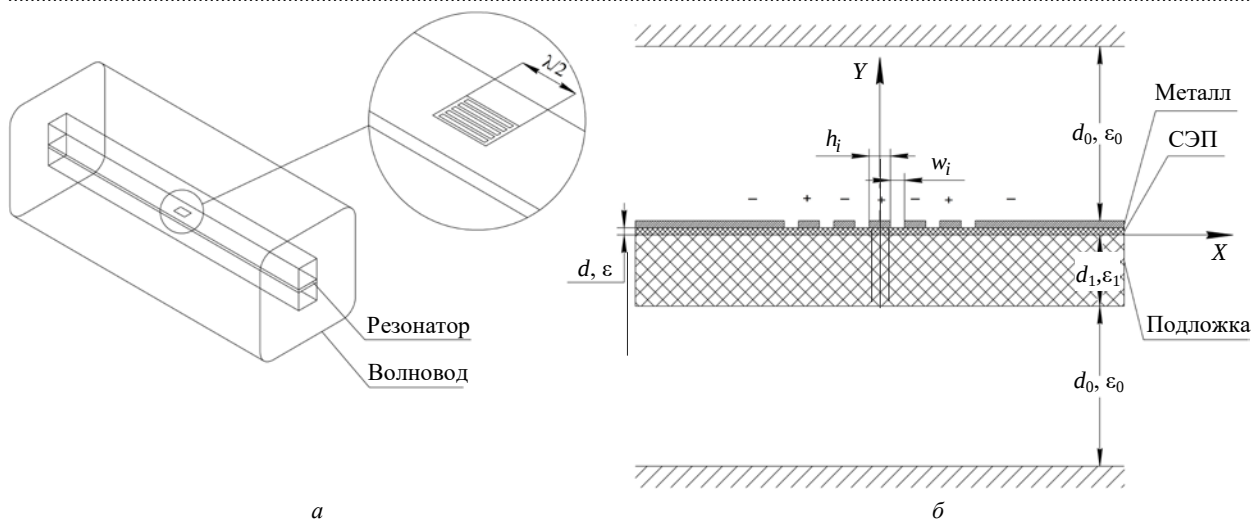


Рис. 3. Волновод с многоэлектродным резонатором (а); поперечное сечение многоэлектродного резонатора с сегнетоэлектрической пленкой на диэлектрической подложке (б)

Fig. 3. Waveguide with a multielectrode resonator (a); cross section of a multielectrode resonator with a ferroelectric film on a dielectric substrate (b)

можно представить как суперпозицию LE- и LM-волн в слоистой диэлектрической структуре, связанных через токи в электродах линии. Зададим векторы Герца для формирования LE- и LM-полей: магнитный $\mathbf{A} = \mathbf{e}_y A(x, y) \exp[-j(\gamma z - \omega t)]$ и электрический $\mathbf{F} = \mathbf{e}_y F(x, y) \exp[-j(\gamma z - \omega t)]$, где γ – постоянная распространения. В каждой области поперечного сечения линий (рис. 3, б) Фурье-образы (ФО) потенциалов $\mathbf{A}_i(y, s)$ и $\mathbf{F}_i(y, s)$ удовлетворяют уравнению

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} + \alpha_i^2 \right) \begin{Bmatrix} \mathbf{A}_i(y, s) \\ \mathbf{F}_i(y, s) \end{Bmatrix} = 0, \quad (11)$$

где $\alpha_i = \sqrt{s^2 + \gamma^2 - k^2 \varepsilon_i}$; ε_i – относительная диэлектрическая проницаемость i -го слоя; $k^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0$ – постоянная распространения в свободном пространстве.

Задачу о нахождении постоянной распространения γ можно решить, выполнив следующие 5 этапов [14, 15]:

1. Найти ФО потенциалов как результат решения уравнения (11).
2. Через ФО потенциалов определить поля LE- и LM-волн.
3. Сшить касательные составляющие E_x , E_z , H_x и H_z на щелях, получив парную си-

стему интегральных уравнений относительно электрического поля на щелях.

4. Решить интегральные уравнения [16] методом Галеркина. Разложение искомого распределения поля на щелях по полиномам Чебышева с последующей процедурой алгебраизации позволило получить систему уравнений относительно неизвестных коэффициентов разложения и постоянной распространения в виде

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \sum_{n=0,1}^{\infty} a_n^{(i)} K_{p,n,i,j}^{(11)}(\dot{\gamma}) + \\ & + \sum_{i=1}^N \sum_{m=1,2}^{\infty} b_m^{(i)} K_{p,m,i,j}^{(12)}(\dot{\gamma}) = 0; \\ & \sum_{i=1}^N \sum_{n=0,1}^{\infty} a_n^{(i)} K_{q,n,i,j}^{(21)}(\dot{\gamma}) + \\ & + \sum_{i=1}^N \sum_{m=1,2}^{\infty} b_m^{(i)} K_{p,m,i,j}^{(22)}(\dot{\gamma}) = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} K_{p,n,i,j}^{(11)}(\gamma) &= (-1)^{n+p} \int_0^\infty J_{2p}(sw_j/2) \times \\ & \times f_{11}(s, \gamma) J_{2p}(sw_j/2) \cos(x_0, i, s) \cos(x_0, j, s) ds; \\ K_{p,m,i,j}^{(12)}(\gamma) &= j(4\gamma_m/w_i) (-1)^{m+p+1} \int_0^\infty J_{2p}(sw_j/2) \times \\ & \times f_{12}(s, \gamma) J_{2m}(sw_i/2) \cos(x_0, i, s) \cos(x_0, j, s) ds; \end{aligned}$$

$$K_{q,n,i,j}^{(21)}(\gamma) = K_{p,m,i,j}^{(12)}(\gamma);$$

$$K_{q,m,i,j}^{(22)}(\gamma) =$$

$$= (-1)^{m+q+2} m q \int_0^\infty \left[J_{2q}(s w_j / 2) f_{22}(s, \gamma) \times \right.$$

$$\left. \times J_{2m}(s w_j / 2) \right] \left[\cos(x_{0,i} s) \cos(x_{0,j} s) / s^2 w_i w_j \right] ds;$$

$J_\nu(z)$ – функция Бесселя I рода [11]; $f_{11}(s, \gamma)$ (аналогично $f_{12}(s, \gamma)$, $f_{22}(s, \gamma)$ в других интегралах) – функции, зависящие от геометрических размеров и диэлектрических проницаемостей слоев; x_{0i} , x_{0j} – координаты центров щелей с шириной w_i , w_j ; N – количество щелей.

5. Обнулить определитель системы уравнений (12), получив искомое значение постоянной распространения.

Численные эксперименты расчета постоянной распространения многоэлектродной структуры представленным методом показали хорошую сходимость результата. В интервале изменения верхнего предела интегрирования значений s от 1000 до 1500 для пятиэлектродной линии при $w = h = 30$ мкм и $d = 0.7$ изменение значения постоянной распространения не превышает 0.5 %.

Результаты расчетов зависимости постоянной распространения в многощелевой линии от числа электродов при различной диэлектрической проницаемости СЭП показаны на рис. 4. Ширина электродов и зазоров между ними

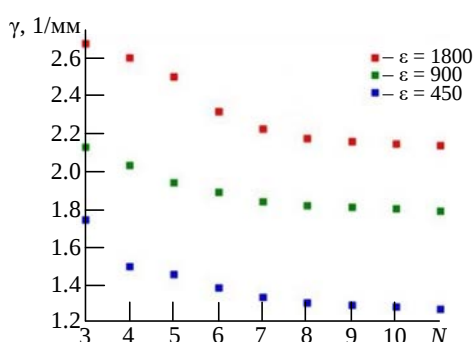


Рис. 4. Зависимость постоянной распространения в многощелевой линии передачи от количества электродов при различных значениях относительной диэлектрической проницаемости СЭП

Fig. 4. The dependence of the propagation constant in a multi-slot transmission line on the number of electrodes at different values of the relative permittivity of the FEF

$w = h = 30$ мкм. Расчеты выполнены для диэлектрической подложки с параметрами $d_1 = 0.5$ мм, $\epsilon_1 = 9.8$ и толщиной СЭП $d = 0.78$ мкм на частоте 30 ГГц.

Результаты расчетов показывают, что увеличение количества электродов в зазоре щелевой линии снижает значение постоянной распространения, которое стремится к некому "постоянному значению". На основе представленной многоэлектродной линии строится конструкция полуволнового резонатора. Описанным ранее способом по результатам натурных измерений резонансной частоты полуволнового многоэлектродного резонатора можно вычислить значения относительной диэлектрической проницаемости ϵ сегнетоэлектрической пленки и определить коэффициент нелинейности СЭП. Число электродов резонатора, значения их ширины и зазоров между ними выбраны с учетом обеспечения оптимального управляющего электрического поля на щелях, а также с условием выравнивания постоянной распространения в зависимости от их количества. Напряжение на электроды резонатора подается через структуру нижних электродов управления, электрически связанных между собой. На рис. 3, б знаками (+) и (–) показано чередование полярности напряжения управления. Электроды управления из платины толщиной ≈ 80 нм и шириной 1.5 мкм сформированы на поверхности диэлектрической подложки и располагаются под сегнетоэлектрической пленкой. На рис. 5 представлены результаты измерения резонансной частоты полувол-

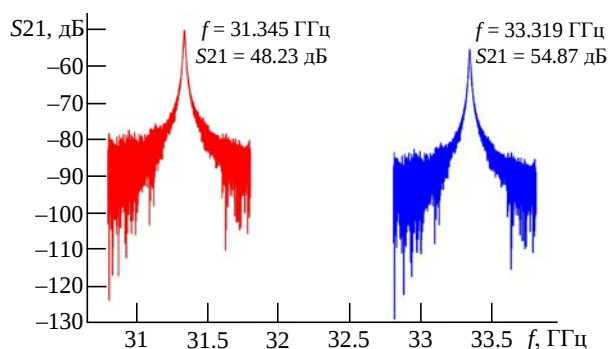


Рис. 5. Зависимость резонансной частоты полуволнового пятиэлектродного резонатора от управляющего напряжения: $U = 0$ В (синий график); $U = 200$ В (красный график)

Fig. 5. Dependence of the resonant frequency of a half-wave multielectrode resonator on the value of the control voltage: $U = 0$ V (blue graph); $U = 200$ V (red graph)

нового пятиэлектродного резонатора длиной $L = 1.42$ мм, сформированного на структуре *диэлектрическая подложка – сегнетоэлектрическая пленка* при $w = h = 7$ мкм; $d_1 = 0.5$ мм; $\varepsilon_1 = 9.8$; $d_2 = 0.78$ мкм.

Численный расчет, выполненный по результатам измерений резонансных частот резонатора, позволил получить значения относительных диэлектрических проницаемостей СЭП при $U = 0$; $\varepsilon_2 \approx 800$ и при $U = 200$ В, $\varepsilon_2 \approx 420$. Коэффициент управления относительной диэлектрической проницаемостью $K_\varepsilon(U) \approx 1.9$ при напряженности электрического поля на щелях линии $E = 28.5$ В/мкм.

Заключение. На данный момент существует множество различных методов измерения и расчета электрофизических характеристик диэлектриков в СВЧ-диапазоне, однако не все из них применимы для комбинированных структур, состоящих из различных слоев диэлектриков, кото-

рые могут существенно различаться как толщиной, так и диэлектрической проницаемостью. Представленный метод расчета двухслойного объемного резонатора позволяет выполнить численные оценки его характеристик, а для разработки и производителей электронной компонентной базы ВЧ–СВЧ-диапазонов – проектировать элементы с температурностабильными характеристиками. Многоэлектродный резонатор в структуре *диэлектрическая подложка – сегнетоэлектрическая пленка*, позволил по резонансной частоте при подаче управляющего напряжения определить диэлектрическую проницаемость и коэффициент управления СЭП в СВЧ-диапазоне, что невозможно выполнить существующими способами. Описанные в статье подходы к вычислениям относительной диэлектрической проницаемости линейных и нелинейных диэлектриков по результатам измерений резонансной частоты для объемных и пленочных материалов могут найти широкое практическое применение.

Список литературы

1. Ширман Я. Д. Радиоволноводы и объемные резонаторы. М.: Связьиздат, 1959. 379 с.
2. Dielectric Resonators with High Q-factor for Tunable Low Phase Noise Oscillators / L. Zhou, W. Y. Yin, J. Wang, L. S. Wu // IEEE Trans. on CPMT. 2013. Vol. 3, № 6. P. 1008–1015. doi: 10.1109/TCSPMT.2013.2258465
3. Геворкян В., Кочемасов В. Объемные диэлектрические резонаторы – основные типы, характеристики, производители // Электроника НТБ. 2016. № 4. С. 62–76.
4. Егоров Е. В., Малышев В. М. Экранированная колебательная система опорного СВЧ-генератора с торцевым возбуждением дискового диэлектрического резонатора // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10, № 2. С. 45–57. doi: 10.18721/JCSTCS.10204
5. Обзоры по электронной технике / Л. В. Алексеевич, И. И. Бродуленко, В. М. Геворкян, Ю. А. Казанцев, Л. А. Парышкуро. Сер. 1: Электроника СВЧ. 1981. Вып. 13 (832). 97 с.
6. Капилевич Б. Ю. Волноводные диэлектрические фильтры. М.: Связь, 1980. 136 с.
7. Вендик О. Г., Иванов И. В., Соколов А. И. Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / под ред. О. Г. Вендика. М.: Сов. радио, 1979. 272 с.
8. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики / Г. А. Смоленский, В. А. Боков, В. А. Исупов и др. М.: Наука, 1971. 476 с.
9. BaTiO₃-based piezoelectrics: Fundamentals, current status, and perspectives / M. Acosta, N. Novak, V. Rojas, S. Patel, R. Vaish, J. Koruza, G. A. Rossetti, J. Rödel // Applied Physics Reviews. 2017. Vol. 4, № 4. P. 041305. doi: 10.1063/1.4990046
10. Раевский А. С., Раевский С. Б. Комплексные волны. М.: Радиотехника, 2010. 223 с.
11. Бейтмен Г., Эрдейи А. Функции Бесселя, функции параболического цилиндра, ортогональные многочлены // Высшие трансцендентные функции. / пер. с англ. Н. Я. Виленкина. 2-е изд. М.: Наука, 1974. Т. 2. 296 с.
12. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1973. 736 с.
13. Hornsby J. S., Gopinath A. Fourier Analysis of a Dielectric-Loaded Waveguide with a Microstrip // Electron. Lett. 1969. Vol. 5. P. 265–267.
14. Мироненко И. Г., Иванов А. А. Дисперсионные характеристики щелевых и копланарных линий на основе структуры "сегнетоэлектрическая пленка–диэлектрическая подложка" // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27, вып. 13. С. 22–26.
15. Мироненко И. Г., Иванов А. А. Многощелевые линии передачи сверхвысоких частот на основе структуры "сегнетоэлектрическая пленка–диэлектрическая подложка" // ЖТФ. 2002. Т. 74, вып. 2. С. 68–73.
16. On the Numerical Solution of Two-Dimensional Potential Problems by an Improved Boundary Integral Equations Method / G. F. Fairweather, J. Rizzo, D. J. Shippey, Y. S. Wu // J. Computational Physics. 1979. Vol. 31. P. 96–112.

Информация об авторах

Севериков Василий Сергеевич – магистр по специальности "Техническая физика" (2019, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого), аспирант кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – разработка ЭКБ и устройств СВЧ-диапазона.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: severva3@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5247-6006>

Фам Конг Че – магистр по специальности "Радиоэлектронные системы" (2016, Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны), аспирант кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – разработка ЭКБ и устройств СВЧ-диапазона.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: kxanhlindhngthdtrach@gmail.com

Мельник Вячеслав Игоревич – кандидат технических наук (1989), доцент (1991) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 15 научных работ. Сфера научных интересов – проектирование радиоэлектронной аппаратуры.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: melnikvi@yandex.ru

References

1. Shirman, Ya. D. *Radiovolnovody i ob'emnye rezonatory* [Radio Waveguides and Volumetric Resonators]. Moscow, Svyazizdat, 1959, 379 p. (In Russ.)
2. Zhou L., Yin W. Y., Wang J., Wu L. S. Dielectric Resonators with High Q-factor for Tunable Low Phase Noise Oscillators. *IEEE Trans. on CPMT*. 2013, vol. 3, no. 6, pp. 1008–1015. doi: 10.1109/TCPMT.2013.2258465
3. Gevorkyan V., Kochemasov V. Cavity Dielectric Resonators – Basic Types, Characteristics, Manufacturers. Part 1. *Electronics NTB*. 2016, no. 4, pp. 62–76. (In Russ.)
4. Egorov E. V., Malyshev V. M. Oscillating System of a Reference Microwave Generator with Screened Dielectric Resonator Excited from an End Face. *St. Petersburg State Polytechnical University J. Computer Science. Telecommunications and Control Systems*. 2017, vol. 10, no. 1, pp. 45–57. doi: 10.18721/JCSTCS.10204 (In Russ.)
5. Alekseychik L. V., Brodulenko I. I., Gevorkyan V. M., Kazantsev Yu. A., Paryshkuro L. A. Reviews on Electronic Technology. Episode 1: Microwave Electronics. 1981, iss. 13 (832), 97 p. (In Russ.)
6. Kapilevich B. Yu. *Volnovodnye dielektricheskie fil'try* [Waveguide Dielectric Filters]. Moscow, Communication, 1980, 136 p. (In Russ.)
7. Vendik O. G., Ivanov I. V., Sokolov A. I. *Segnetoelektriki v tekhnike SVCh* [Ferroelectrics in Microwave Technology]. Ed. by O. G. Vendik. Moscow, Sov. Radio, 1979, 272 p. (In Russ.)
8. Smolenskii G. A., Bokov V. A., Isupov V. A. *Segnetoelektriki i antisegetoelektriki* [Ferroelectrics and Antiferroelectrics]. Moscow, Nauka, 1971, 476 p. (In Russ.)
9. Acosta M., Novak N., Rojas V., Patel S., Vaish R., Koruza J., Rossetti G. A., Rödel J. BaTiO₃-Based Piezoelectrics: Fundamentals, Current Status, and Perspectives. *Applied Physics Reviews*. 2017, vol. 4, no. 4, pp. 041305. doi: 10.1063/1.4990046
10. Raevskii A. S., Raevskii S. B. *Kompleksnyye volny* [Complex Waves]. Moscow, Radio engineering, 2010, 223 p. (In Russ.)
11. Bateman G., Erdelyi A. *Higher Transcendental Functions*. Vol. 2. New York, McGraw-Hill, 1953.
12. Lavrent'ev M. A., Shabat B. V. *Metody teorii funktsii kompleksnogo peremennogo* [Methods of the Theory of Functions of a Complex Variable]. Moscow, Nauka, 1973, 736 p. (In Russ.)
13. Hornsby J. S., Gopinath A. Fourier Analysis of a Dielectric-Loaded Waveguide with a Microstrip. *Electron. Lett.* 1969, vol. 5, pp. 265–267.
14. Mironenko I. G., Ivanov A. A. *Dispersionnyye kharakteristiki shchelevykh i koplanarnykh linii na osnove struktury "segnetoelektricheskaya plenka-dielektricheskaya podlozhka"* [Dispersion Characteristics of Slot and Coplanar Lines Based on the Ferroelectric Film–Dielectric Substrate Structure]. *Technical Physics [Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki]*. 2001, vol. 27, iss. 13, pp. 22–26. (In Russ.)
15. Mironenko I. G., Ivanov A. A. *Mnogoshchelevye linii peredachi sverkhvysokikh chastot na osnove struktury "segnetoelektricheskaya plenka-dielektricheskaya podlozhka"* [Multi-Slot Transmission Lines of Ultrahigh Frequencies Based on the "Ferroe-

lectric Film–Dielectric Substrate" Structure]. Technical Physics [Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki]. 2002, vol. 74, iss. 2, pp. 68–73. (In Russ.)

16. Fairweather G. F., Rizzo J., Shippy D. J., Wu Y. S. On the Numerical Solution of Two-Dimensional Potential Problems by an Improved Boundary Integral Equations Method. J. Computational Physics. 1979, vol. 31, pp. 96–112.

Information about the authors

Vasily S. Severikov – Master in Technical Physics (2019, Peter the Great St Petersburg Polytechnic University), Postgraduate student of the Department of Microradioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: development of electronic components and microwave devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: severva3@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5247-6006>

Fam Kong Che – Master in Radioelectronic systems (2016, Yaroslavl Higher Military Institute of the Air Defense), Postgraduate student of the Department of Microradioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 1 scientific publications. Area of expertise: development of electronic components and microwave devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: kxanhlinhdangthdtrach@gmail.com

Vyacheslav I. Melnik – Cand. Sci. (Eng.) (1989), Associate Professor (1991) of the Department of Microradioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 15 scientific publications. Area of expertise: design of radio-electronic equipment.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: melnikvi@yandex.ru