

Расчет эффективной диэлектрической проницаемости и емкости щелевого и плоскопараллельного конденсаторов с высокой температурной стабильностью характеристик на основе многослойной сегнетоэлектрической структуры

И. Г. Мироненко¹, С. С. Соколов¹, М. Е. Шевченко¹, В. С. Севериков^{1,2}, Фам Конг Че¹
А. И. Протченко³, Н. Н. Шарова³, А. П. Буровихин¹, А. А. Иванов^{1,2}✉

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

²ОАО "Завод Магнетон", Санкт-Петербург, Россия

³АО «НИИ "Феррит-Домен"», Санкт-Петербург, Россия

✉ aai2@yandex.ru

Аннотация

Введение. Создание современной электронной компонентной базы с улучшенными характеристиками возможно с применением новых материалов и технологий их изготовления. Поэтому важен вопрос анализа электрических параметров электронных компонентов, содержащих материалы, расширяющие их функциональные возможности. Стабилизация электрических свойств конденсаторов с переменной емкостью при изменении управляющего напряжения вследствие температурных воздействий является актуальной задачей. Решить ее можно используя совокупность нелинейных диэлектриков, свойства которых взаимно компенсируют нестабильность эффективной диэлектрической проницаемости емкости в широком интервале температур. К таким материалам относятся сегнетоэлектрики, обладающие спонтанной поляризацией, зависящей от температуры и стороннего электрического поля.

Цель работы. Создание расчетных моделей планарных щелевых и сэндвич-структур, содержащих многослойные пленки с изменяемыми по толщине стехиометрическими составами сегнетоэлектрических материалов. На основе таких структур можно спроектировать конденсаторы, емкость которых зависит от управляющего напряжения. Их можно использовать в качестве сосредоточенных элементов схем, работающих в диапазонах НЧ–СВЧ–длин волн и обладающих высокой температурной стабильностью.

Материалы и методы. Вычислительные математические модели для анализа слоистых структур созданы с помощью метода конформных отображений и использования граничных условий для касательных и нормальных компонент электрического поля.

Результаты. Выполнен анализ емкости щелевого и сэндвич (плоскопараллельного)-конденсаторов на многослойных структурах. Получены результаты расчета емкости конденсаторов в зависимости от количества сегнетоэлектрических слоев и их толщин с различными стехиометрическими составами, обеспечивающими требуемую стабильность в заданном интервале температур. Увеличение количества слоев в структуре с трех до пяти расширяет температурный диапазон стабилизации эффективной диэлектрической проницаемости емкости с ~50 °С до ~120...160 °С.

Заключение. Созданные математические модели позволили численно оценить температурную и полевую стабильность многослойных пленочных структур на основе бариево-стронциевых составов для применения их в качестве основы при построении компонентной базы с электрической перестройкой емкости.

Ключевые слова: слоистая структура, сегнетоэлектрические конденсаторные структуры, вариконды

Для цитирования: Расчет эффективной диэлектрической проницаемости и емкости щелевого и плоскопараллельного конденсаторов с высокой температурной стабильностью характеристик на основе многослойной сегнетоэлектрической структуры / И. Г. Мироненко, С. С. Соколов, М. Е. Шевченко, В. С. Севериков, Фам Конг Че, А. И. Протченко, Н. Н. Шарова, А. П. Буровихин, А. А. Иванов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 6. С. 6–19. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-6-19

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 15.10.2024; принята к публикации после рецензирования 18.11.2024; опубликована онлайн 27.12.2024

Calculation of the Effective Dielectric Constant and Capacitance of Slit and Plane-Parallel Capacitors with High Temperature Stability Characteristics Based on a Multilayer Ferroelectric Structure

Igor G. Mironenko¹, Sergey S. Sokolov¹, Maya E. Shevchenko¹,
Vasily S. Severikov^{1,2}, Fam Kong Che¹, Artemy I. Protchenko³,
Natalia N. Sharova³, Anton P. Burovikhin¹, Arkady A. Ivanov^{1,2}✉

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²JSC "Magnetron Plant", St Petersburg, Russia

³JSC Research Institute "Ferrite-Domain", St Petersburg, Russia

✉ aai2@yandex.ru

Abstract

Introduction. The creation of a modern electronic component base with improved characteristics requires new materials produced using new manufacturing technologies. In this connection, it is important to analyze the electrical parameters of electronic components produced based on materials that extend their functionality. Therefore, stabilization of the electrical properties of capacitors with variable capacitance under changes in the control voltage due to temperature influences is a relevant research task. Its solution can be performed using a set of nonlinear dielectrics, the properties of which mutually compensate for the instability of capacitance over a wide temperature range.

Aim. Creation of computational models of planar slit structures containing multilayer films with thickness-variable stoichiometric compositions of ferroelectric materials. Such structures allow capacitors with the capacitance varying under the impact of control voltage to be designed. These structures can be used as concentrated circuit elements operated in the low-frequency–microwave-wavelength ranges and possessing high temperature stability.

Materials and methods. Computational mathematical models for the analysis of layered structures were developed using the method of conformal maps and using boundary conditions for tangential and normal components of the electric field.

Results. The capacitance of slit and plane-parallel capacitors on multilayer structures was analyzed. The capacitance of capacitors depending on the number of ferroelectric layers and their thicknesses with various stoichiometric compositions providing the required stability in a given temperature range was calculated. An increase in the number of layers in the structure from three to five extends the temperature range of stabilization of the effective dielectric constant of the capacitor from about 50 °C to about 120...160 °C.

Conclusion. The developed mathematical models were used to numerically evaluate the temperature and field stability of multilayer film structures based on barium strontium compositions for their use as a basis for constructing a component base with electrical capacity adjustment.

Keywords: layered structure, ferroelectric capacitor structures, variconds

For citation: Mironenko I. G., Sokolov S. S., Shevchenko M. E., Severikov V. S., Fam Kong Che, Protchenko A. I., Sharova N. N., Burovikhin A. P., Ivanov A. A. Calculation of the Effective Dielectric Constant and Capacitance of Slit and Plane-Parallel Capacitors with High Temperature Stability Characteristics Based on a Multilayer Ferroelectric Structure. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 6, pp. 6–19. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-6-19

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

Submitted 15.10.2024; accepted 18.11.2024; published online 27.12.2024

Введение. Современные тенденции развития приборов и устройств, работающих в ВЧ–СВЧ-диапазонах, предъявляют новые требования к усовершенствованию пассивной электронной компонентной базы с электронным управлением их

электрическими параметрами. Такая электронная компонентная база создается из материалов, электрофизические характеристики которых (сопротивление, относительная магнитная и диэлектрическая проницаемости) изменяются под действи-

ем электрического тока, магнитного или электрического поля. Для построения электронной компонентной базы (ЭКБ), в частности конденсаторов переменной емкости, можно использовать нелинейные диэлектрики, обладающие спонтанной поляризацией. К таким материалам относятся перовскиты, сегнетоэлектрические материалы с кубической (псевдокубической) структурой $A^2B^4O_3$, титаната бария стронция $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BST) [1–11]. Такие материалы обладают высокой диэлектрической проницаемостью, которая изменяется под действием внешнего управляющего электрического поля. Однако недостатком элементной базы на основе перовскитов является зависимость их характеристик от температуры. Поэтому для температурной стабилизации ЭКБ (конденсаторов различного конструктивного исполнения) на основе сегнетоэлектриков можно использовать слоистые структуры, где каждый слой будет иметь свой температурный коэффициент диэлектрической проницаемости [1, 7]. Таким образом, можно создать слоистую диэлектрическую структуру с минимальной зависимостью электрических параметров конденсатора от температуры [10]. Слоистые диэлектрические структуры, созданные последовательностью слоев с различными диэлектрическими свойствами, можно оценить эффективной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{эф}$. Следует отметить, что пленки BST, входящие в слоистую структуру, должны иметь толщины примерно $10^{-1}...10^{-2}$ мкм и разную концентрационную зависимость x . Таким образом, эффективная диэлектрическая проницаемость многослойной структуры определяется свойствами слоев.

Постановка и решение задачи определения емкости планарного щелевого конденсатора. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости от температуры и внешнего электрического поля для сегнетоэлектрических объемных материалов можно описать различными математическими моделями. В рассматриваемом случае для описания диэлектрических свойств BST использована модель Кюри–Вейса [1, 10], которая хорошо согласуется с экспериментальными зависимостями от температуры и содержания бария и

стронция. Выбранная модель зависимости $\varepsilon(\eta, \xi)$ была подтверждена экспериментально [5–11]. Модель зависимости относительной диэлектрической проницаемости от содержания бария, внешнего электрического поля и температуры запишем в виде

$$\varepsilon(\eta, \xi) = \frac{\varepsilon_{00}(x)}{\left[\left(\xi^2 + \eta^3 \right)^{\frac{1}{2}} + \xi \right]^{\frac{2}{3}} + \left[\left(\xi^2 + \eta^3 \right)^{\frac{1}{2}} - \xi \right]^{\frac{2}{3}} - \eta}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{00}(x) = \frac{C(x)}{T_C(x)}$ – диэлектрическая воспри-

имчивость сегнетоэлектрика ($C(x)$ – зависимость постоянной Кюри от содержания бария и стронция; $T_C(x)$ – зависимость температуры Кюри сегнетоэлектрика состава $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ от содержания бария и стронция); $x = (0, ...1)$ – массовая доля бария и стронция в составе твердого раствора $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$; $\xi = \frac{E}{E_H}$ – безразмерный параметр (E – напряженность внешнего электрического поля; E_H – напряженность нормализованного поля: $E_H = 19 + 1250x - 330x^2 -$

$- 220x^3$); $\eta(x) = \frac{\Theta_F}{4T_C(x)} \sqrt{1 + \left(\frac{4T}{\Theta_F} \right)^2} - 1$ – без-

размерный параметр, зависящий от содержания бария с учетом изменения внешней абсолютной температуры T (Θ_F – температура Дебая, значение которой для рассматриваемого сегнетоэлектрического материала выбирается в пределах 170...180 К). Экспериментальные исследования объемных и толстопленочных образцов состава $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ в зависимости от содержания бария и стронция в широком интервале температур позволили определить зависимости постоянной Кюри $C(x)$ и температуры Кюри $T_C(x)$ в виде $C(x) = 0.78 + 0.76x$, $T_C(x) = 42 + 439x - 96x^2$ [1–5]. Таким образом, на основании (1) можно построить зависимости диэлектрической проницаемости от темпе-

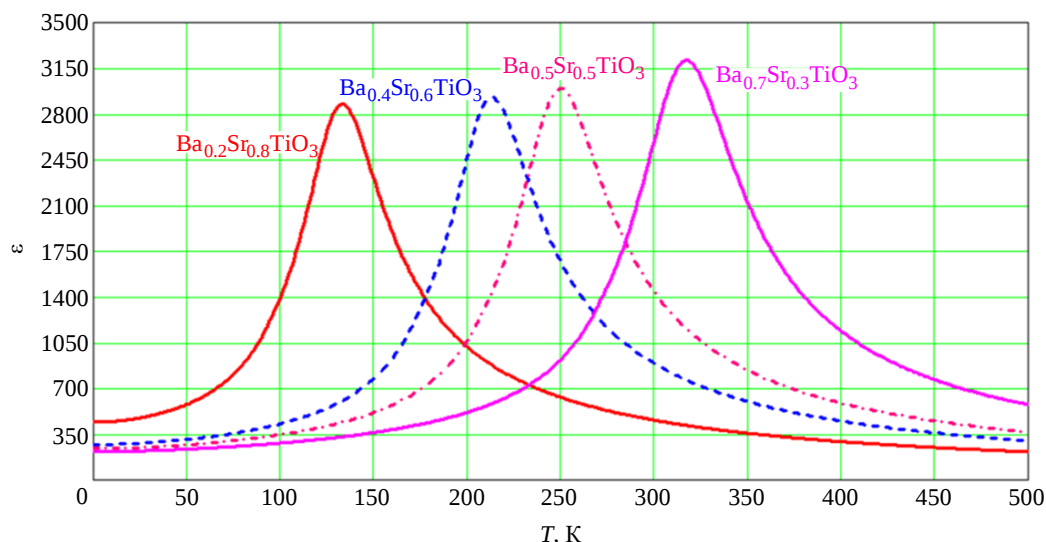


Рис. 1. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки (BST) от температуры при различной массовой доле бария и стронция ($x = 0.2$; $x = 0.4$; $x = 0.5$; $x = 0.7$)

Fig. 1. The dependence of the relative permittivity of a ferroelectric film (BST) on temperature at different concentrations of barium and strontium ($x = 0.2$; $x = 0.4$; $x = 0.5$; $x = 0.7$)

ратуры и внешнего управляющего поля сегнетоэлектрического слоя при различной массовой доле бария и стронция (рис. 1). Анализируя графики температурной зависимости $\varepsilon(\eta, \xi)$ BST от значения x логично предположить, что можно создать многослойную структуру, в которой зависимость относительной диэлектрической проницаемости будет слабо изменяться в заданном интервале температур.

Найдем эффективную диэлектрическую проницаемость многослойной BST-структуры на основе расчета емкости щелевого планарного конденсатора.

Для этого воспользуемся методом конформных отображений. В основе расчета лежит инвариантность емкости к конформным отображениям, что позволяет свести исходную топологию электродов к конфигурации плоского конденсатора. При этом непроницаемые для поля границы диэлектрического слоя переходят в непроницаемые границы плоского конденсатора. Тем самым исключается краевой эффект, т. е. при конформных отображениях исходной конфигурации электродов и диэлектрических границ возникает конфигурация идеального плоского конденсатора. Очевидно, что проницаемая для поля граница "подложка-BST-структура" не может быть отображена без нарушения плоскопараллельности поля. Следовательно, применяя конформные отображения для расчета емкости в

неоднородной диэлектрической среде, можно рассчитывать только на приблизительные количественные оценки эффекта проникновения поля в подложку [12–15].

Поперечное сечение планарного щелевого конденсатора на многослойной BST-структуре, реализованного на диэлектрической подложке, изображено на рис. 2 (1 – металлические электроды; 2 – слоистая BST-структура суммарной толщиной d с эффективной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{\text{эф}}$ и толщиной i -го слоя d_i с относительной диэлектрической проницаемостью ε_i ; 3 – диэлектрическая подложка с относительной диэлектрической проницаемостью ε_1 , толщиной $d_{\text{подл}} = H - d = H - \sum_i d_i$, где H – суммарная толщина структуры; s – ширина зазо-

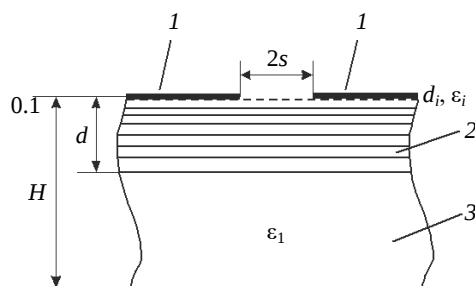


Рис. 2. Поперечное сечение планарного конденсатора на подложке с многослойной сегнетоэлектрической структурой

Fig. 2. Cross section of a planar capacitor on a substrate with a multilayer ferroelectric structure

ра. Из (1) видно, что ε_i – функция от T и массовой доли бария x_i состава $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$, т. е. имеем $\varepsilon_i(x_i, T)$.

Модель для расчета погонной емкости щелевого планарного конденсатора представим в виде структуры с бесконечными электродами и двумя магнитными стенками, расположенными на ширине зазора и на границе диэлектрической подложки (рис. 2), тем самым обеспечивая для касательных составляющих электрического поля режим холостого хода.

Часть щелевого планарного многослойного конденсатора показана на плоскости комплексной переменной $z = x + jy$ (рис. 3, а) в виде четырехугольника, симметричного относительно мнимой оси jy . Используя конформное отображение [12–14], топологию щелевого конденсатора на плоскости z можно преобразовать к плоскости $w = u + jv$. На рис. 3, б показан плоскопараллельный конденсатор в плоскости комплексной переменной w , где A – область подложки; B – область слоистой структуры. Видно, что прямоугольники на рис. 3, а и б связаны между собой, т. е. внутренняя область одного прямоугольника (рис. 3, а) конформно отображена на внутреннюю область другого (рис. 3, б). Следовательно, емкости этих конденсаторов будут равны. Следуя методике, изложенной в [12–14], запишем отображение функции в виде интеграла Кристоффеля–Шварца:

$$w = F(t, k) = \int_0^t \frac{d\xi}{\sqrt{(1-\xi^2)(1-\xi^2 k^2)}}, \quad (2)$$

где $F(t, k)$ – неполный эллиптический интеграл первого рода; $k = e^{\frac{\pi s}{H}}$ – модуль эллиптического интеграла.

Значение комплексной переменной z позволяет определить верхнее значение предела интегрирования t в (2):

$$t = \frac{k - \operatorname{ch}\left(\frac{\pi z}{H}\right)}{k \operatorname{ch}\left(\frac{\pi z}{H}\right) - 1}. \quad (3)$$

Таким образом, на основании (2) и (3) получено конформное отображение одного прямоугольника (рис. 3, а) на другой (рис. 3, б). Границы прямоугольника на рис. 3, б (2, 6), (3, 5) и (2, 3), (6, 5) определяются значениями эллиптических интегралов в нормальной форме $K(k)$, $K'(k')$ [12–14], где $K'(k')$ – интеграл от дополнительного модуля $k' = \sqrt{1-k^2}$. В плоскости w зададим границы: между подложкой и первым слоем BST-структуры уравнением $z = x + jh$; между BST-слоями $z = x + jd_i$. Как видно из рис. 3, б, касательные составляющие электрического поля на границах диэлектрических слоев непрерывны, но при этом на всем протяжении границ существуют и нормальные составляющие электрического поля. Будем считать, что доминируют касательные составляющие поля при условиях, что $s \ll H$, $s \gg H$ и $s \gg d_i$. Из этого утверждения следует, что границы диэлектрических слоев будут параллельны линиям прямоугольника (2, 3) и (6, 5).

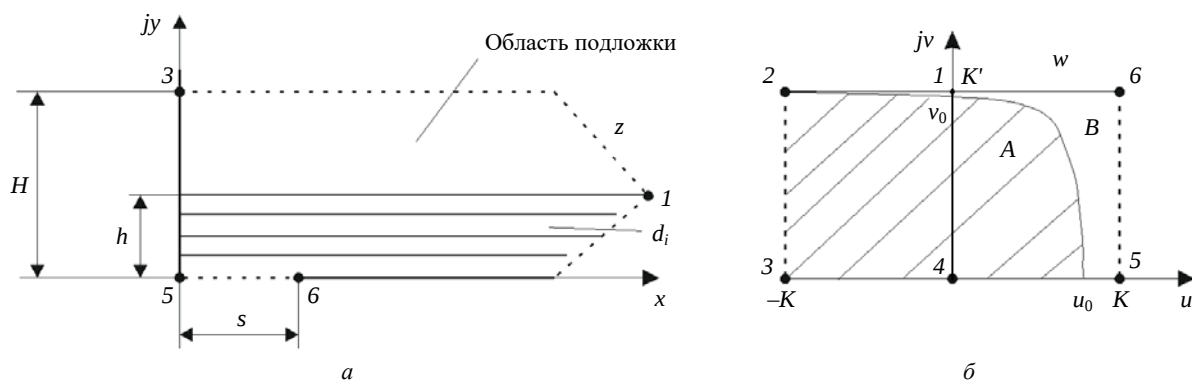


Рис. 3. Симметричная часть планарного конденсатора: а – в плоскости комплексной переменной z ; б – в плоскости комплексной переменной w

Fig. 3. Symmetrical part of the cross section of a slit planar capacitor: а – in the z plane; б – in the complex plane w

Определим вид границ на вещественной и мнимой осях (рис. 3, б). Граница на мнимой оси комплексной плоскости $z = x + jh$ при x_0 , отвечающая условию $\operatorname{Re}(t) = 0$, есть jv_0 . С учетом (3) найдем, что x_0 удовлетворяет уравнению

$$\operatorname{ch}\left(\frac{\pi x_0}{H}\right) = \frac{\cos\left(\frac{\pi h}{H}\right)}{k}.$$

Будем считать, что $\cos\left(\frac{\pi h}{H}\right) \cong 1$ и $e^{\frac{\pi s}{H}} \cong 1 - \frac{\pi s}{H}$. Записав $\operatorname{ch}\left(\frac{\pi x_0}{H}\right) \approx 1 + \frac{1}{2}\left(\frac{\pi x_0}{H}\right)^2$, найдем, что $x_0 = \sqrt{\frac{2sH}{\pi}}$. Таким образом, из (3) следует, что при $x = x_0$ точное значение

$$\operatorname{Im}(t_0) = j \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{\pi x_0}{H}\right)}{\sin\left(\frac{\pi h}{H}\right)}.$$

Подставив в это соотношение

$$x_0 = \sqrt{\frac{2sH}{\pi}}, \text{ получим, что } \operatorname{Im}(t_0) \approx j \sqrt{\frac{2sH}{\pi h^2}}.$$

Найдем численную оценку этого выражения, задав геометрические размеры щелевого конденсатора: $s \geq 10^{-2}$ мм; $H = 1$ мм; $h = 10^{-3}$ мм. Тогда $\operatorname{Im}(t_0) \approx j10^2$. Затем получим v_0 из эллиптического интеграла $jv_0 = F(jt_0, k)$, который при $t \rightarrow \infty$ можно заменить на $F(j\infty, k) = \frac{\pi}{2}$.

Найденная численная оценка позволяет утверждать, что горизонтальная часть многослойной структуры практически параллельна верхнему электроду и совпадает с ним. Положение верхнего электрода определяется $K' \approx \frac{\pi}{2}$ при $k' \ll 1$, по-

этому границы BST-слоев на оси jv близки к $\frac{\pi}{2}$.

Определим расположение точки $z = jh$ на оси u (рис. 3, б). Из (3) следует, что значение верхнего предела интегрирования t_0 в (2) равно:

$$t_0 = \frac{k - \cos\left(\frac{\pi h}{H}\right)}{k \cos\left(\frac{\pi h}{H}\right) - 1},$$

тогда $u_0 = F(t_0, k)$. Запишем соотношение для определения погонной емкости щелевого конденсатора с учетом влияния подложки в виде

$$C = \frac{\varepsilon_0}{\pi} [\varepsilon_1 (K + u_0) + \varepsilon_{\text{эф}} (K - u_0)], \quad (4)$$

где ε_1 – диэлектрическая проницаемость подложки; $\varepsilon_{\text{эф}}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость многослойной структуры. Таким образом, из (4), зная геометрические размеры структуры, ее электрофизические параметры и значение емкости, получаемое из эксперимента, можно найти значение эффективной диэлектрической проницаемости

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \frac{\frac{\pi C}{\varepsilon_0} - \varepsilon_1 (K + u_0)}{K - u_0}. \quad (5)$$

Приближения, сделанные для получения формулы (5), обеспечивают малую погрешность оценки $\varepsilon_{\text{эф}}$. При этом нужно понимать, что $t_0 \cong 1$, необходимо точно вычислять u_0 , которое близко к K .

Определим связь между $\varepsilon_{\text{эф}}$ многослойной BST-структуры и параметрами ε_i и d_i слоев, входящих в нее. Обозначим $d = d_1 + d_2 + \dots + d_n = \sum_i d_i$ – толщину сегнетоэлектрической структуры и положим $H = d$, исключив из анализа диэлектрическую подложку. Найдем емкость конденсатора, состоящего только из многослойной BST-структуры. Соотношения

(2) и (3) сохраняются с учетом, что $k = e^{-\frac{\pi s}{d}}$. Так как $s/d > 1$ и $k \rightarrow 0$, значения эллиптических интегралов равны $K = \frac{\pi}{2}$, а $K' = \ln \frac{4}{k} = 1.38 + \frac{\pi s}{d}$.

Определим границы BST-слоев на плоскости w , заданных уравнениями $z = x + j(d_1 + d_2 + \dots + d_i)$. Найдем положение точки jv_0 для нижнего слоя положив $z = x + jd_1$. Тогда значение абсциссы x_0 , удовлетворяющее уравнению:

$$\operatorname{ch}\left(\frac{\pi x_0}{d}\right) = \frac{\cos\left(\frac{\pi d_1}{d}\right)}{k}.$$

Следовательно, при $k \ll 1$ $\operatorname{ch}\left(\frac{\pi x_0}{d}\right) = e^{\frac{\pi s}{d}}$ и при $s/d \gg 1$ получаем, что $x \approx s$.

Таким образом, значение $\operatorname{Im}(t_0) = j \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{\pi s}{d}\right)}{\sin\left(\frac{\pi d_1}{d}\right)}$ велико, тогда $jv_0 = F(jt_0, k) \approx \approx K'(k')$.

Отсюда следует, что точка v_0 находится на верхнем электроде (2, 6) в плоскости w (см. рис. 3, б).

Определим положение u_0 на оси v плоскости w , $v_0 = F(t_0, k)$. Значения t_0 в этом случае определяются значениями слоев d_i . Найдем t_0 для нижнего слоя из (3) задав $z = jd_1$ и полагая $d_i/d \ll 1$. Учитывая, что $k \ll 1$, а $\cos\left(\frac{\pi d_1}{d}\right) \approx 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\pi d_1}{d}\right)^2$, получим $t_0 \approx 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\pi d_1}{d}\right)^2$.

$$\text{Тогда } v_0 = F(t_0, k) = \int_0^{1-x} \frac{d\xi}{\sqrt{(1-\xi^2)(1-\xi^2 k^2)}},$$

где $x = \frac{1}{2}\left(\frac{\pi d_1}{d}\right)^2$. Определим v_0 , представив интеграл в виде

$$v_0 = \int_0^1 \frac{d\xi}{\sqrt{(1-\xi^2)(1-\xi^2 k^2)}} - \int_1^{1-x} \frac{d\xi}{\sqrt{(1-\xi^2)(1-\xi^2 k^2)}}.$$

$$\text{Интеграл } \int_0^1 \frac{d\xi}{\sqrt{(1-\xi^2)(1-\xi^2 k^2)}} = K(k),$$

второй интеграл в равенстве при $k \ll 1$ равен

$$\int_1^{1-x} \frac{d\xi}{\sqrt{(1-\xi^2)(1-\xi^2 k^2)}} = \arcsin\left(\frac{\pi d_1}{d}\right) \approx \frac{\pi d_1}{d}. \quad \text{Следова-}$$

тельно, толщина первого слоя в области w равна $K - u_0 = \frac{\pi d_1}{d}$. Толщина произвольного i -го

слоя в плоскости w равна $\frac{\pi d_i}{d}$. Таким образом, многослойный конденсатор суммарной толщи-

ной d в плоскости w можно представить параллельно соединенными конденсаторами с толщинами слоев d_i и диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_i(x_i, T)$. Погонная емкость такого конденсатора будет определена в виде

$$C = \frac{\varepsilon_0 \pi}{\left(\ln 4 + \frac{\pi s}{d}\right) d} \sum_{i=1} \varepsilon_i(x_i, T) d_i.$$

Считая, что $\frac{\pi s}{d} \gg 1$, запишем погонную

$$\text{емкость конденсатора } C = \frac{\varepsilon_0}{s} \sum_{i=1} \varepsilon_i(x_i, T) d_i.$$

Тогда эффективная диэлектрическая проницаемость многослойного планарного конденсатора

$$\varepsilon_{\text{эф}}(T) = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i(x_i, T) d_i. \quad (6)$$

Синтез многослойной сегнетоэлектрической структуры с заданной температурной зависимостью диэлектрической проницаемости. Перейдем к рассмотрению эффективной диэлектрической проницаемости многослойной структуры с учетом ее зависимости от температуры, массовой доли бария в каждом слое и его толщины.

Для равных толщин слоев BST-структуры температурный коэффициент эффективной диэлектрической проницаемости можно записать в виде

$$\frac{\partial \varepsilon_{\text{эф}}(T)}{\partial T} = \frac{\partial \varepsilon_1(x_1, T)}{\partial T} + \frac{\partial \varepsilon_2(x_2, T)}{\partial T} + \frac{\partial \varepsilon_3(x_3, T)}{\partial T} + \dots + \frac{\partial \varepsilon_i(x_i, T)}{\partial T}.$$

На рис. 4 представлены зависимости производных диэлектрической проницаемости по температуре для BST-слоев при значениях $x_1 = 0.2$, $x_2 = 0.4$, $x_3 = 0.5$, $x_4 = 0.7$. Видно, что в интервале температур для каждого значения x производные меняют знак. Следовательно, можно найти такую совокупность слоев с необходимыми значениями, которые позволят обеспечить минимальное изменение коэффициента эффективной диэлектрической проницаемости в заданном температурном диапазоне. Дополнительная возможность температурной стабилизации связана с выбором толщин слоев. Очевидно,

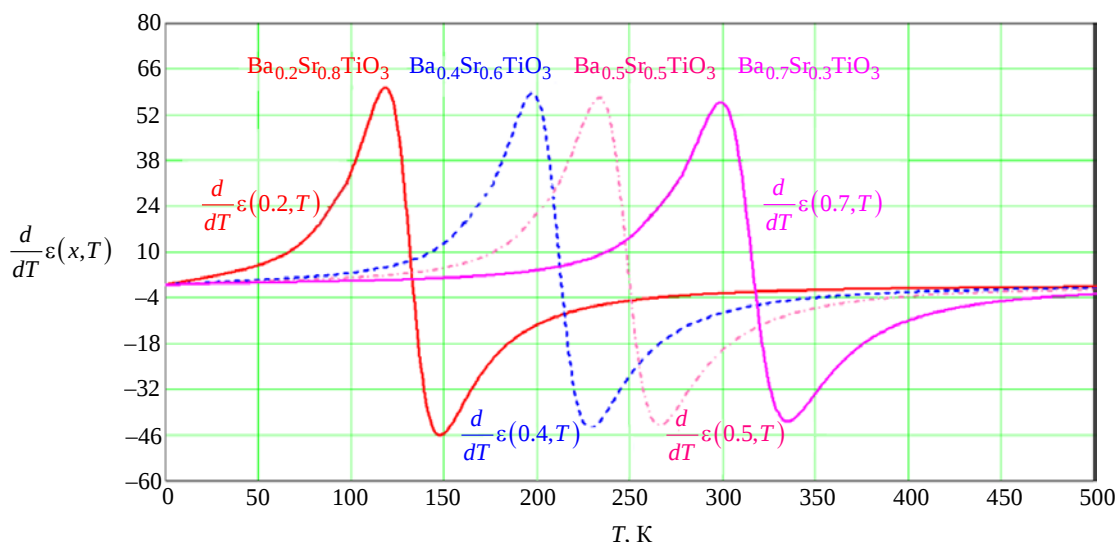


Рис. 4. Зависимости производных диэлектрической проницаемости нанослоев от температуры для различных массовых долей стронция в BST-структуре ($x_1 = 0.2$; $x_2 = 0.4$; $x_3 = 0.5$; $x_4 = 0.7$)

Fig. 4. Dependences of the derivatives of the dielectric constant of nanolayers for different values of the concentration dependences BST ($x_1 = 0.2$; $x_2 = 0.4$; $x_3 = 0.5$; $x_4 = 0.7$)

что в широком интервале температур невозможно обеспечить требуемый уровень температурной стабилизации $\varepsilon_{\text{эф}}$ с тремя или четырьмя сегнетоэлектрическими слоями. Увеличение температурного интервала стабилизации $\varepsilon_{\text{эф}}$ требует большего числа слоев.

Следовательно, можно найти такие значения параметров x_i , d_i и количество слоев i , которые обеспечат требуемую температурную зависимость $\varepsilon_{\text{эф}}(T)$ с допустимым минимальным отклонением от заданного значения $f(T)$. Для оценки приближения $\varepsilon_{\text{эф}}(T)$ к требуемой $f(T)$ найдем его среднеквадратическое отклонение на интервале температур T_1 , T_2 в виде

$$M(x_i, d_i) = \int_{T_1}^{T_2} [f(T) - \varepsilon_{\text{эф}}(T)]^2 dT. \quad (7)$$

Минимальное значение $M(x_i, d_i)$ будет отвечать такому набору параметров, которые обеспечат оптимальное приближение $\varepsilon_{\text{эф}}(T)$ к $f(T)$. Обнуление всех частных производных по x_i и d_i среднеквадратического отклонения $M(x_i, d_i)$ приводит к системе уравнений. Подставим (6) в (7) и запишем систему уравнений

$$\frac{\partial M(x_i, d_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \int_{T_1}^{T_2} \left[f(T) - \frac{1}{2s} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i(x_i, T) d_i \right]^2 dT = 0; \quad (8)$$

$$\frac{\partial M(x_i, d_i)}{\partial d_i} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial d_i} \int_{T_1}^{T_2} \left[f(T) - \frac{1}{2s} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i(x_i, T) d_i \right]^2 dT = 0,$$

где $i = 1, 2, \dots, n$.

Таким образом, задаваясь $f(T)$ в требуемом температурном интервале и решая систему уравнений (8), определяем оптимальное значение слоев их толщин и концентрационных зависимостей.

На рис. 5 представлена структура плоскопараллельного сэндвич-конденсатора на многослойной сегнетоэлектрической структуре со слоями диэлектрической проницаемостью ε_{Ni} , толщиной d_{Ni} , сформированной на диэлектрической подложке с ε_1 , d_1 . Рассмотрим случай, когда сегнетоэлектрическая структура расположена между металлическими электродами при $\Delta \gg d$ (рис. 5, б).

Такая структура представляет собой конденсатор с последовательным соединением емкостей, следовательно, суммарная емкость дан-

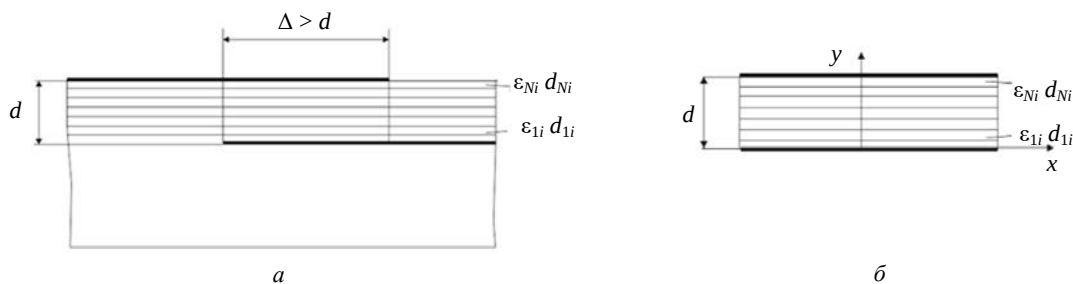


Рис. 5. Поперечное сечение сэндвич-конденсатора на многослойной сегнетоэлектрической структуре:
а – $\Delta > d$; б – $\Delta \gg d$

Fig. 5. Cross section of a sandwich capacitor on a multilayer ferroelectric structure: а – $\Delta > d$; б – $\Delta \gg d$

ного конденсатора $C = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}$. Тогда эффективная диэлектрическая проницаемость такой структуры запишется в виде

$$\varepsilon_{\text{эф}}(x_i, d_i, T) = \frac{d}{\frac{d_1}{\varepsilon_1(x_1, T)} + \frac{d_2}{\varepsilon_2(x_2, T)} + \dots + \frac{d_N}{\varepsilon_N(x_N, T)}}$$

Запишем систему уравнений для определения параметров, приближающих температурную зависимость эффективной диэлектрической проницаемости к заданной $f(T)$ по наименьшему среднему квадратическому отклонению для сэндвич-конденсатора, в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial M(x_i, d_i)}{\partial x_i} &= \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \int_{T_1}^{T_2} \left[f(T) - \frac{d}{\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{\varepsilon_{\text{эф}}(x_i, d_i, T)}} \right]^2 dT &= 0; \\ \frac{\partial M(x_i, d_i)}{\partial d_i} &= \\ \frac{\partial}{\partial d_i} \int_{T_1}^{T_2} \left[f(T) - \frac{d}{\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{\varepsilon_{\text{эф}}(x_i, d_i, T)}} \right]^2 dT &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$.

На рис. 6–8 представлены графики температурных зависимостей эффективной диэлектрической проницаемости многослойной щелевой структуры для различного количества сегнето-

электрических слоев, полученных из решений систем уравнений (8) и (9). Из графиков видно, что с увеличением числа слоев расширяется температурный интервал стабилизации эффективной диэлектрической проницаемости.

На рис. 9 показаны численные результаты расчета температурных зависимостей эффективной диэлектрической проницаемости пяти-слойной сэндвич-структуры.

Таким образом, результаты расчетов показывают, что заданием количества слоев BST возможно нахождение их концентрационных зависимостей и толщин, которые обеспечат необходимое значение эффективной диэлектрической проницаемости слоистой сегнетоэлек-

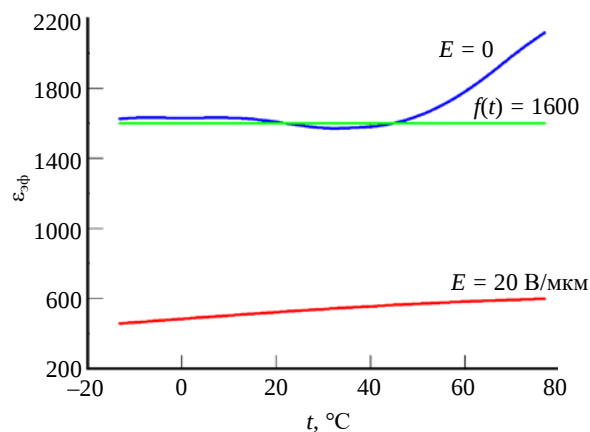


Рис. 6. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от температуры и управляющего электрического поля в планарном щелевом конденсаторе для трехслойной структуры при $s = 10$ мкм; $x_1 = 0.401$; $x_2 = 0.59$; $x_3 = 0.74$; $d_1 = 0.3$ мкм; $d_2 = 0.1$ мкм; $d_3 = 0.6$ мкм; $d = 0.5$ мм

Fig. 6. Dependence of the effective dielectric constant on temperature and the control electric field in a planar slit capacitor for a three-layer structure, when $s = 10$ μm ; $x_1 = 0.401$; $x_2 = 0.59$; $x_3 = 0.74$; $d_1 = 0.3$ μm ; $d_2 = 0.1$ μm ; $d_3 = 0.6$ μm ; $d = 0.5$ mm

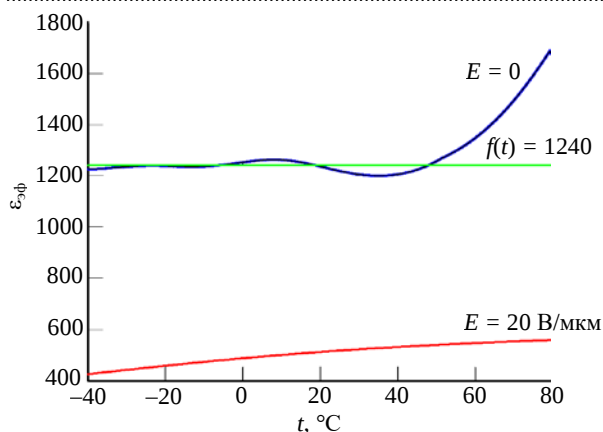


Рис. 7. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от температуры и управляющего электрического поля в планарном щелевом конденсаторе для четырехслойной структуры при $s = 10$ мкм; $x_1 = 0.21$; $x_2 = 0.25$; $x_3 = 0.4$; $x_4 = 0.82$; $d_1 = 0.2$ мкм; $d_2 = 0.17$ мкм; $d_3 = 0.15$ мкм; $d_4 = 0.35$ мкм; $d = 0.5$ мм; $\epsilon_1 = 9.8$

Fig. 7. Dependence of the effective dielectric constant on temperature and the control electric field in a planar slit capacitor for a four-layer structure, when $s = 10$ μm ; $x_1 = 0.21$; $x_2 = 0.25$; $x_3 = 0.4$; $x_4 = 0.82$; $d_1 = 0.2$ μm ; $d_2 = 0.17$ μm ; $d_3 = 0.15$ μm ; $d_4 = 0.35$ μm ; $d = 0.5$ mm; $\epsilon_1 = 9.8$

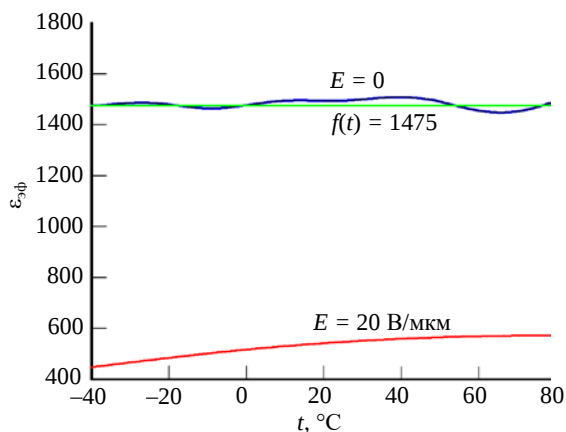


Рис. 8. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от температуры и управляющего электрического поля в планарном щелевом конденсаторе для пятислойной структуры при $s = 10$ мкм; $x_1 = 0.17$; $x_2 = 0.5$; $x_3 = 0.37$; $x_4 = 0.7$; $x_5 = 0.87$; $d_1 = 0.19$ мкм; $d_2 = 0.28$ мкм; $d_3 = 0.34$ мкм; $d_4 = 0.21$ мкм; $d_5 = 0.19$ мкм; $d = 0.5$ мм; $\epsilon_1 = 9.8$

Fig. 8. Dependence of the effective dielectric constant on temperature and the control electric field in a planar slit capacitor for a five-layer structure, at $s = 10$ μm ; $x_1 = 0.17$; $x_2 = 0.5$; $x_3 = 0.37$; $x_4 = 0.7$; $x_5 = 0.87$; $d_1 = 0.19$ μm ; $d_2 = 0.28$ μm ; $d_3 = 0.34$ μm ; $d_4 = 0.21$ μm ; $d_5 = 0.19$ μm ; $d = 0.5$ mm; $\epsilon_1 = 9.8$

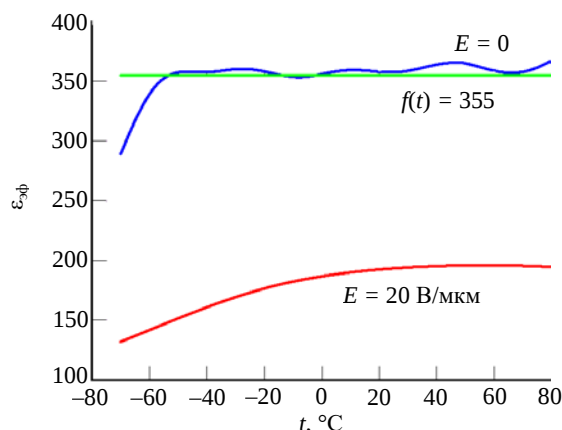


Рис. 9. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от температуры и управляющего электрического поля в сэндвич-конденсаторе для пятислойной структуры при $x_1 = 0.72$; $x_2 = 0.54$; $x_3 = 0.22$; $x_4 = 0.4$; $x_5 = 0.9$; $d_1 = 0.23$ мкм; $d_2 = 0.16$ мкм; $d_3 = 0.19$ мкм; $d_4 = 0.11$ мкм; $d_5 = 0.2$ мкм; $d = 0.5$ мм; $\epsilon_1 = 9.8$

Fig. 9. Dependence of the effective dielectric constant on temperature and the control electric field in a sandwich capacitor for a five-layer structure, when, at $x_1 = 0.72$; $x_2 = 0.54$; $x_3 = 0.22$; $x_4 = 0.4$; $x_5 = 0.9$; $d_1 = 0.23$ μm ; $d_2 = 0.16$ μm ; $d_3 = 0.19$ μm ; $d_4 = 0.11$ μm ; $d_5 = 0.2$ μm ; $d = 0.5$ mm; $\epsilon_1 = 9.8$

трической структуры в заданном температурном интервале.

Закключение. Рассмотренные расчетные модели показали, что стабилизация электрических параметров в плоскопараллельном и щелевом конденсаторах на многослойной сегнетоэлектрической структуре может быть достигнута за счет выбора количества слоев, их толщин и концентрационных зависимостей и определяется требуемой температурной стабилизацией эффективной диэлектрической проницаемости. Увеличение количества слоев в BST-структуре позволяет расширить температурный диапазон стабилизации $\epsilon_{\text{эф}}$ и обеспечить приемлемую управляемость ее характеристиками. Температурный интервал стабилизации $\epsilon_{\text{эф}}$, оцениваемой единицами процента отклонения от среднего значения, достигает 120...160° при количестве сегнетоэлектрических слоев в структуре более шести.

Авторский вклад

Мироненко Игорь Германович – формулировка и постановка задачи нахождения эффективной диэлектрической проницаемости в слоистой структуре; вывод аналитических выражений для поиска искомого значения эффективной диэлектрической проницаемости и емкости в слоистой структуре.

Соколов Сергей Сергеевич – анализ возможности температурной стабилизации эффективной диэлектрической проницаемости в слоистой структуре.

Шевченко Майя Евгеньевна – проектирование структур на многослойных сегнетоэлектрических пленках.

Севериков Василий Сергеевич – нахождение оптимальных значений стехиометрических составов сегнетоэлектрических слоев для обеспечения температурной стабилизации планарного щелевого конденсатора.

Фам Конг Че – нахождение оптимальных значений толщин с учетом стехиометрических составов сегнетоэлектрических слоев для обеспечения температурной стабилизации планарного щелевого конденсатора.

Протченко Артемий Игоревич – нахождение оптимальных значений толщин и стехиометрических составов сегнетоэлектрических слоев для обеспечения температурной стабилизации сэндвич-конденсатора.

Шарова Наталья Николаевна – создание программы расчета концентрационной зависимости, толщины и количества слоев в многослойной сегнетоэлектрической структуре.

Буровихин Антон Павлович – выполнение процесса оптимизации температурной стабильности в сэндвич-конденсаторе.

Иванов Аркадий Анатольевич – постановка и решение задачи нахождения эффективной диэлектрической проницаемости в слоистых щелевой и сэндвич-структурах для обеспечения температурно-стабильного значения емкости в конденсаторах, созданных на их основе.

Author's contribution

Igor G. Mironenko, formulation and statement of the problem of finding the effective permittivity in a layered structure; derivation of analytical expressions for finding the desired value of the effective permittivity and capacitance in a layered structure.

Sergey S. Sokolov, analysis of the possibility of temperature stabilization of the effective permittivity in a layered structure.

Maya E. Shevchenko, design of structures on multilayer ferroelectric films.

Vasily S. Severikov, finding the optimal values of the stoichiometric compositions of ferroelectric layers to ensure temperature stabilization of a planar slot capacitor.

Fam Kong Che, finding the optimal values of thicknesses taking into account the stoichiometric compositions of ferroelectric layers to ensure temperature stabilization of a planar slot capacitor.

Artemy I. Protchenko, finding optimal values of thicknesses and stoichiometric compositions of ferroelectric layers to ensure temperature stabilization of a sandwich capacitor.

Natalia N. Sharova, creating a program for calculating the concentration dependence, thickness and number of layers in a multilayer ferroelectric structure.

Anton P. Burovikhin, performing the process of optimizing temperature stability in a sandwich capacitor.

Arkady A. Ivanov, setting and solving the problem of finding the effective permittivity in layered slot and sandwich structures to ensure a temperature-stable capacitance value in capacitors created on their basis.

Список литературы

1. Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / Н. Н. Антонов, И. М. Бузин, О. Г. Вендик и др.; под ред. О. Г. Вендика. М.: Сов. радио, 1979. 272 с.

2. Вербицкая Т. Н., Александрова Л. М., Широбокова Е. И. Электрические свойства пленочных варикондов с прямоугольной петлей гистерезиса // Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1965. Т. 29. С. 2104.

3. СВЧ-свойства сегнетоэлектрических пленок с размытым фазовым переходом / О. Г. Вендик, С. П. Зубко, М. С. Гашинова, Н. Ю. Некрасова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2005. Вып. 1. С. 15–19.

4. Вербицкая Т. Н. Титанат бария. М.: Наука, 1973. 273 с.

5. Диэлектрические свойства тонких пленок SrTiO_3 и $\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{TiO}_3$ / Б. М. Гольцман, В. В. Леманов, А. И. Дедык, Л. Т. Тер-Мартirosян, С. Ф. Карманенко // ФТТ. 1996. Т. 38, вып. 8. С. 2493–2496.

6. Технология и диэлектрические свойства многослойных нанокompозитных сегнетоэлектрических пленок / В. М. Балашов, И. Г. Мироненко, А. А. Ива-

нов, А. И. Фирсенков, Д. В. Велькин, О. В. Яковлев, Н. А. Емельянов // Вопр. радиоэлектроники. 2018. № 1. С. 62–67.

7. Применение наноразмерных пленок титаната бария-стронция для перестраиваемых сверхвысоко-частотных устройств / Вас. М. Мухортов, С. И. Масычев, Ю. И. Головкин, А. В. Чуб, В. М. Мухортов // ЖТФ. 2006. Т. 76, вып. 10. С. 106–109.

8. СВЧ фазовращатель с планарными конденсаторами на основе пленок титаната стронция / А. Козырев, А. Иванов, О. Солдатенков, Е. Гольман, А. Прудан, В. Логинов // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25, вып. 20. С. 78–83.

9. Composition-control of magnetron-sputter-deposited $(\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x})\text{TiO}_3$ thin films for voltage tunable devices / Im. Jaemo, O. Auciello, P. K. Baumann, S. K. Streiffer, D. Kaufman, A. R. Krauss // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 76. P. 625–627. doi: 10.1063/1.125839

10. The fabrication and material properties of compositionally multilayered $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ thin films for realiza-

tion of temperature insensitive tunable phase shifter devices / M. W. Cole, E. Ngo, S. Hirsch, J. D. Demaree, S. Zhong, S. P. Alpay // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 102. P. 034104. doi: 10.1063/1.2761849

11. Сегнетоэлектрические пленки и устройства на сверх- и крайне высоких частотах / А. А. Иванов, И. Г. Мироненко, С. Ф. Карманенко и др. СПб.: Элмор, 2007. 162 с.

12. Маркушевич А. И. Краткий курс теории аналитических функций. 4-е изд., испр. и доп. М.: Наука, 1978. 416 с.

13. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1973. 736 с.

14. Лаврентьев М. А. Конформные отображения. М.; Л.: Гостехиздат, 1946. 160 с.

15. Layered planar capacitor based on $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ with variable parameter x / O. G. Vendik, S. P. Zubko, S. F. Karmanenko, M. A. Nikol'ski, N. N. Isakov, I. T. Serenkov, V. I. Sakharov // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91, № 1. P. 331–335. doi: 10.1063/1.1421035

Информация об авторах

Мироненко Игорь Германович – доктор технических наук (1979), профессор (1981) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – разработка ЭКБ; проектирование радиоэлектронной аппаратуры 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: eltech-mit-mig@gmail.com

Соколов Сергей Сергеевич – доктор технических наук (1993), профессор (1995) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – разработка ЭКБ; проектирование радиоэлектронной аппаратуры 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: sovet@etu.ru

Шевченко Майя Евгеньевна – кандидат технических наук (1997), доцент (2002) кафедры радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 80 научных работ. Сфера научных интересов – прием и обработка радиосигналов; обнаружение, оценивание и пеленгование сигналов, радиомониторинг; цифровая обработка сигналов.

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

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 четырех 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 двух научных 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: kxanhlinhdangthdtrach@gmail.com

Протченко Артемий Игоревич – инженер по специальности "Материаловедение и технологии новых материалов" (2000, Санкт-Петербургский горный институт), заместитель генерального директора по государственному оборонному заказу АО «НИИ "Феррит-Домен"». Автор ряда закрытых публикаций по синтезу материалов для применения в СВЧ-устройствах высокого уровня мощности. Сфера научных интересов – разработка ферритовых и диэлектрических материалов для пассивной ЭКБ и устройств СВЧ-диапазона.

Адрес: АО «НИИ "Феррит-Домен"», ул. Цветочная, д. 25, к. 3, лит. Б, Санкт-Петербург, 196006, Россия
E-mail: a.i.protchenko@domen.ru

Шарова Наталья Николаевна – инженер по специальности "Прикладная математика и информатика" (1997, Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля), заместитель генерального директора

Расчет эффективной диэлектрической проницаемости и емкости щелевого

и плоскопараллельного конденсаторов с высокой температурной стабильностью

характеристик на основе многослойной сегнетоэлектрической структуры

Calculation of the Effective Dielectric Constant and Capacitance of Slit and Plane-Parallel Capacitors with High Temperature Stability Characteristics Based on a Multilayer Ferroelectric Structure

АО «НИИ "Феррит-Домен"». Сфера научных интересов – разработка математических моделей для ЭКБ.
Адрес: АО «НИИ "Феррит-Домен"», ул. Цветочная, д. 25, к. 3, лит. Б, Санкт-Петербург, 196006, Россия
E-mail: n.n.sharova@domen.ru

Буровихин Антон Павлович – инженер 2-й категории лаборатории технологии материалов и элементов интегральной радиофотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 24 научных публикаций. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; мультиферроики; пироэлектричество; электрокалорика.

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

E-mail: antonburovihin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5147-0630>

Иванов Аркадий Анатольевич – доктор технических наук (2018), профессор (2020) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – разработка ЭКБ; проектирование радиоэлектронной аппаратуры 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: aai2@yandex.ru

References

1. Antonov N. N., Buzin I. M., Vendik O. G. *Segnetoelektriki v tekhnike SVCh* [Ferroelectrics in Microwave Technology]. Ed. by O. G. Vendik. Moscow, Soviet Radio, 1979, 272 p. (In Russ.)
2. Verbitskaya T. N., Alexandrova L. M., Shirobokova E. I. Electrical Properties of Film Variconds with a Rectangular Hysteresis Loop. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 1965, vol. 29, p. 2104. (In Russ.)
3. Vendik O. G., Zubko S. P., Gashinova M. S., Nekrasova N. Yu. *SVCh-svoistva segnetoelektricheskikh plenok s razmytym fazovym perekhodom* [Microwave Properties of Ferroelectric Films with a Blurred Phase Transition]. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2005, iss. 1, pp. 15–19. (In Russ.)
4. Verbitskaya T. N. *Titanat bariya* [Barium Titanate]. Moscow, Nauka, 1973, 273 p. (In Russ.)
5. Gol'tsman B. M., Lemanov V. V., Dedyk A. I., Ter-Martirosyan L. T., Karmanenko S. F. Electrical Properties of a Thin Layer of SrTiO_3 and $\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{TiO}_3$. *Physics of the Solid State*. 1996, vol. 38, iss. 8, pp. 2493–2496. (In Russ.)
6. Balashov V. M., Mironenko I. G., Ivanov A. A., Firsenskov A. I., Velkin D. V., Yakovlev O. V., Emelyanov N. A. Technology and Dielectric Properties of Nanocomposite Multilayer Ferroelectric Films. *Questions of Radio Electronics*. 2018, no. 1, pp. 62–67. (In Russ.)
7. Mukhortov Vas. M., Masyshev S. I., Golovko Yu. I., Chub A. V., Mukhortov V. M. Application of Nanoscale Films of Barium-Strontium Titanate for Tunable Ultrahigh Frequency Devices. *Technical Physics*. 2006, vol. 76, iss. 10, pp. 106–109. (In Russ.)
8. Kozyrev A., Ivanov A., Soldatenkov O., Golman E., Prudan A., Loginov V. Microwave Phase Shifter with Planar Capacitors Based on Strontium Titanate Films. *Technical Physics Let.* 1999, vol. 25, iss. 20, pp. 78–83. (In Russ.)
9. Jaemo Im., Auciello O., Baumann P. K., Streiffer S. K., Kaufman D., Krauss A. R. Composition-control of Magnetron-Sputter-Deposited $(\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x})\text{TiO}_3$ Thin Films for Voltage Tunable Devices. *Appl. Phys. Let.* 2000, vol. 76, pp. 625–627. doi: 10.1063/1.125839
10. Cole M. W., Ngo E., Hirsch S., Demaree J. D., Zhong S., Alpay S. P. The Fabrication and Material Properties of Compositionally Multilayered $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ thin Films for Realization of Temperature Insensitive Tunable Phase Shifter Devices. *J. Appl. Phys.* 2007, vol. 102, p. 034104. doi: 10.1063/1.2761849
11. Ivanov A. A., Mironenko I. G., Karmanenko S. F., Semenov A. A., Nazarov I. A. *Segnetoelektricheskie plenki i ustroistva na sverkh- i kraine vysokikh chastotakh* [Ferroelectric Films and Devices at Ultra- and Extremely High Frequencies]. St Petersburg, Elmore, 2007, 162 p. (In Russ.)
12. Markushevich A. I. *Kratkii kurs teorii analiticheskikh funktsii* [A Short Course in the Theory of Analytical Functions]. 4th ed. Moscow, Nauka, 1978, 416 p. (In Russ.)
13. Lavrentyev M. A., Khabat B. V. *Metody teorii funktsii kompleksnogo peremennogo* [Methods of Theoretical Analysis]. Moscow, Nauka, 1973, 736 p. (In Russ.)
14. Lavrentiev M. A. *Konformnye otobrazheniya* [Official Images]. Moscow; Leningrad, Gosizdat, 1946, 160 p. (In Russ.)
15. Vendik O. G., Zubko S. P., Karmanenko S. F., Nikol'ski M. A., Isakov N. N., Serenkov I. T., Sakharov V. I. Layered Planar Capacitor Based on $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ with Variable Parameter x . *J. Appl. Phys.* 2002, vol. 91, no. 1, pp. 331–335. doi: 10.1063/1.1421035

Information about the authors

Igor G. Mironenko, Dr Sci. (Eng.) (1979), Professor (1981) of the Department of Microradioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: ECB development; design of radio-electronic equipment and microwave devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: eltech-mit-mig@gmail.com

Sergey S. Sokolov, Dr Sci. (Eng.) (1993), Professor (1995) of the Department of Microradioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: ECB development; design of radio-electronic equipment and microwave devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: sovet@etu.ru

Maya E. Shevchenko, Cand. Sci. (Eng.) (1997), Associate Professor (2002) of the Department of Radio Electronics Equipment of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 80 scientific publications. Area of expertise: radio signal reception and processing; signal detection, evaluation and direction finding, radio monitoring; digital signal processing.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197002, Russia
E-mail: m_e_shevchenko@mail.ru, meshevchenko@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6873-6354>

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 4 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 2 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

Artemy I. Protchenko, engineer in Materials Science and Technologies of New Materials (2000, St Petersburg Mining Institute), Deputy Director General for State Equipment Order of Ferrite-Domen Scientific Research Institute. The author of a number of closed publications on the synthesis of materials for use in high-power microwave devices. Area of expertise: development of ferrite and dielectric materials for passive ECB and microwave devices.

Address: Ferrite-Domen Scientific Research Institute, 25, build. 3, let. B, Tsvetochnaya St., St Petersburg 196006, Russia
E-mail: a.i.protchenko@domen.ru

Natalia N. Sharova, Engineer in Applied Mathematics and Computer Science (1997, Vladimir Dahl East Ukrainian National University), Deputy General Director of Ferrite-Domen Scientific Research Institute. Area of expertise: development of mathematical models for ECB.

Address: Ferrite-Domen Scientific Research Institute, 25, build. 3, let. B, Tsvetochnaya St., St Petersburg 196006, Russia
E-mail: n.n.sharova@domen.ru

Anton P. Burovikhin, engineer of the Laboratory of Technology of Materials and Elements of Integrated Radiophotonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 24 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; multiferroics; pyro-electricity; electrocaloris.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: antonburovihin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5147-0630>

Arkady A. Ivanov, Dr Sci. (2018), Professor (2020) of the Department of Microradioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: ECB development; design of radio-electronic equipment and microwave devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: aai2@yandex.ru
