

Твердотельная электроника

УДК 621.382.383

А.Ю. Очеретный, Ю.В. Прокопенко, канд. техн. наук, В.И. Молчанов, канд.техн. наук,
Ю.М. Поплавко, д-р физ.-мат. наук

Измерение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки на основе копланарной линии передачи СВЧ

Предложен метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки, интегрированной в копланарную линию передачи. Метод основан на двух-портовом измерении частотной зависимости комплексной матрицы рассеяния отрезка копланарной линии и аппроксимации этой зависимости теоретической, рассчитанной на основе метода конечных элементов.

The measurement technique for measurement of complex permittivity of ferroelectric film integrated to coplanar line is discussed. The technique is based on two-port measurement of complex scattering matrix in frequency domain and its approximation by theoretical dependence simulated by the finite elements method.

Ключевые слова: сегнетоэлектрическая пленка, копланарная линия, измерение, диэлектрическая проницаемость, тангенс диэлектрических потерь, характеристическое сопротивление.

Введение

Сегнетоэлектрические пленки находят применение как конденсаторные материалы, как элементы памяти [1] и как компоненты электрически управляемых устройств [2]. При конструировании таких устройств необходимо достоверно измерять диэлектрическую проницаемость и потери пленок. СВЧ свойства тонких пленок существенно отличаются от свойств объемных образцов материалов, из которых они изготовлены [3]. Тонкая пленка наносится на подложку, которая имеет отличающиеся тепловые и механические свойства. Это приводит к изменению свойств пленки, которые могут быть как желательными, так и неприемлемыми для использования в электронике. Твердые растворы (Ba, Sr) TiO₃ (BST) являются одними из наиболее изученных материалов для перестраиваемых СВЧ устройств. Диэлектрическая проницаемость ϵ пленки при нанесении на подложку снижается до 10 раз по сравнению с проницаемостью объемных образцов. Температурная

зависимость диэлектрической проницаемости может также существенно ослабляться. Поэтому пленка толщиной 0.1-1 мкм, будучи нанесенной на подложку с $\epsilon \sim 10 - 25$ и тангенсом диэлектрических потерь $\text{tg}\delta \sim 10^{-4}$, может иметь проницаемость $\sim 200 - 2000$, тогда как потери составляют $\text{tg}\delta \sim 0.01 - 0.05$ [4].

Для изготовления тонких пленок используются различные физические и химические методы. От конкретного метода нанесения и его параметров существенно зависят как структура, так и свойства пленки. Поэтому для оптимизации процесса нанесения пленок также необходимо иметь достоверный метод измерения их свойств, пригодный для использования на разных стадиях технологического процесса. Изготовленная пленка подлежит использованию в конкретном устройстве, для создания которого на ее поверхность наносится специальная система проводников. Геометрия такой системы непосредственно зависит от диэлектрической проницаемости и потерь пленки. В то же время нанесенные электроды могут изменять диэлектрическую проницаемость и потери в пленке. Поэтому весьма желательно, чтобы измерение тонких пленок было проведено на структурах с нанесенными электродами.

Одна из самых распространенных структур электродов в СВЧ устройствах образует копланарную линию (рис.1). Наличие сегнетоэлектрической пленки позволяет строить на основе такой структуры управляемые фазовращатели [5] и другие управляющие устройства. Ниже рассматриваются вопросы измерения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки, интегрированной в копланарную линию передачи.

1. Интегральные характеристики копланарной линии на подложке с сегнетоэлектрической пленкой

Электродинамическая задача для приведенной на рис.1 структуры решена методом конечных элементов. Электромагнитное поле квази-ТЕМ типа описывалось продольной компонентой электрического векторного потенциала и

скалярным электрическим потенциалом с использованием условия калибровки Лоренца. В итоге задача сведена к дифференциальному уравнению в частных производных относительно скалярного электрического потенциала φ :

$$\nabla(\varepsilon(y)\nabla\varphi) + \varepsilon^2(y)\frac{\omega^2}{c^2}\varphi = 0, \quad (1)$$

где ω – круговая частота, c – скорость света в вакууме, $\varepsilon(y)$ – функция поперечного распределения относительной диэлектрической проницаемости.

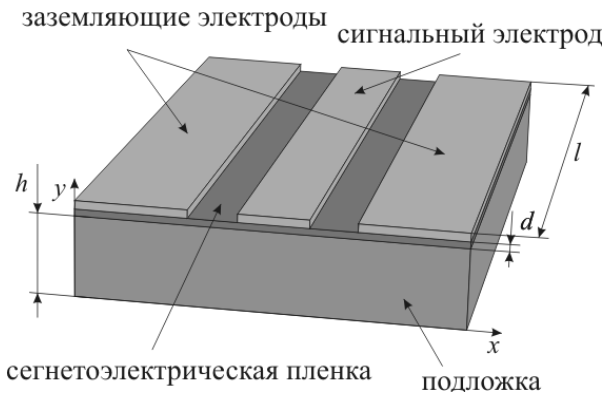


Рис. 1. Копланарная линия на подложке с сегнетоэлектрической пленкой

Решение уравнения (1) позволяет найти интегральные характеристики копланарной линии: характеристическое сопротивление Z и эффективную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_{\text{эф}}$:

$$Z = Z_0 \frac{V^2}{\sum_{i=1}^N \sqrt{\varepsilon_i} \iint_{S_i} \left(\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right) dx dy}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\varepsilon_i \iint_{S_i} \left(\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right) dx dy \right)}{\iint_S \left(\left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \right)^2 \right) dx dy}, \quad (3)$$

где $Z_0 \approx 120\pi$ Ом – характеристическое сопротивление свободного пространства, V – напряжение между электродами, N – количество областей с различной диэлектрической проницаемостью, ε_i – относительная диэлектрическая проницаемость i -й области, S_i – площадь поперечного сечения i -й области, φ_1 – решение задачи (1) при $\varepsilon_i = 1, i = \overline{1, N}$.

Зависимости характеристического сопротивления и эффективной диэлектрической

проницаемости копланарной линии, размещенной на подложке с нанесенной сегнетоэлектрической пленкой, показаны на рис.2.

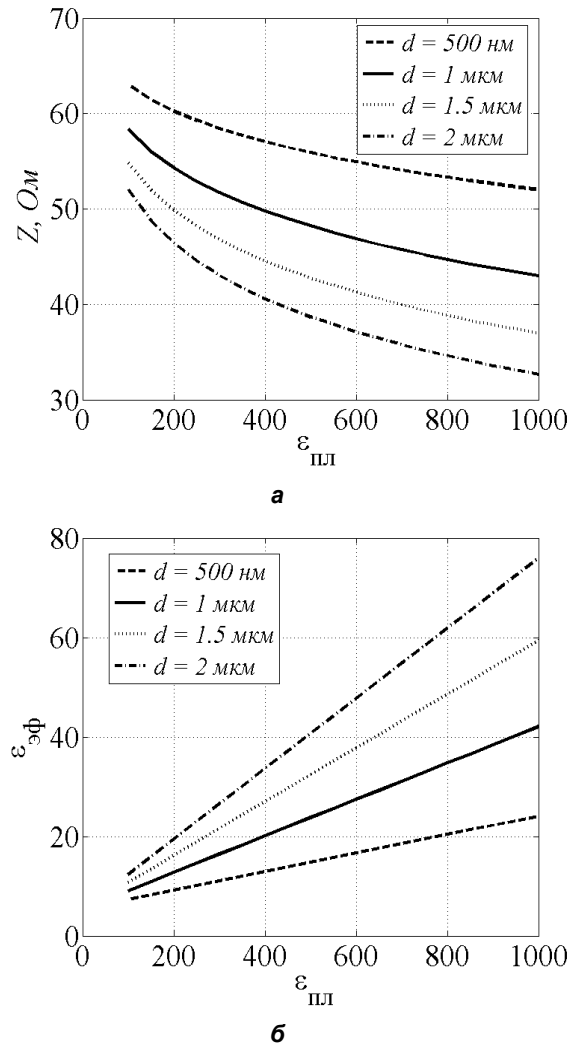


Рис. 2. Зависимости характеристического сопротивления (а) эффективной диэлектрической проницаемости (б) копланарной линии от толщины и относительной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки, нанесенной на подложку с $\varepsilon_n=10$

2. Методика измерения относительной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки

Для измерения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь тонких пленок использовалась измерительная ячейка, показанная на рис. 3. Пленки наносились методом лазерной абляции на подложки, изготовленные из монокристаллического MgO, ориентации (001). Тонкие пленки $\text{Ba}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{TiO}_3$ наносились с помощью импульсного эксимерного лазера. Нанесение производилось при температуре 780°C в атмосфере кислорода под давлением 50 мм рт. ст. Толщи-

на полученных пленок составляла примерно 500 нм. Пленки также отжигались при температуре 1050°C в атмосфере кислорода под давлением 1 атм в течение 24 часов.

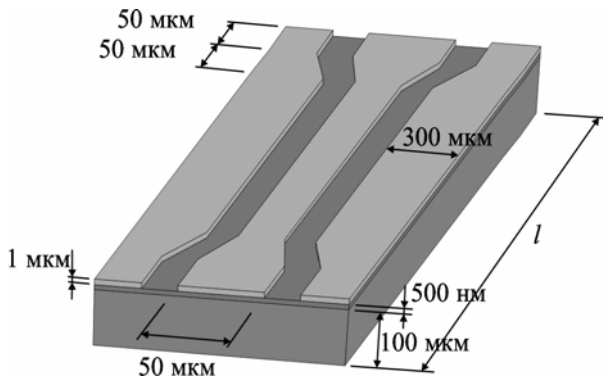


Рис. 3. Структура для измерения электрофизических параметров сегнетоэлектрической пленки

Измерения частотной зависимости параметров рассеяния проводились при помощи векторного панорамного измерителя HP 8510C в диапазоне 8 – 12 ГГц.

Матрица рассеяния отрезка копланарной линии длиной l , подключенная к портам с характеристическим сопротивлением Z_1 рассчитывается из выражений:

$$S_{11} = j \frac{(Z^2 - Z_1^2) \sin(\gamma l)}{2ZZ_1 \cos(\gamma l) + j(Z^2 + Z_1^2) \sin(\gamma l)}, \quad (4)$$

$$S_{21} = \frac{2ZZ_1}{2ZZ_1 \cos(\gamma l) + j(Z^2 + Z_1^2) \sin(\gamma l)}, \quad (5)$$

где $\gamma = \frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_{эф}}}{c}$ – постоянная распространения в копланарной линии.

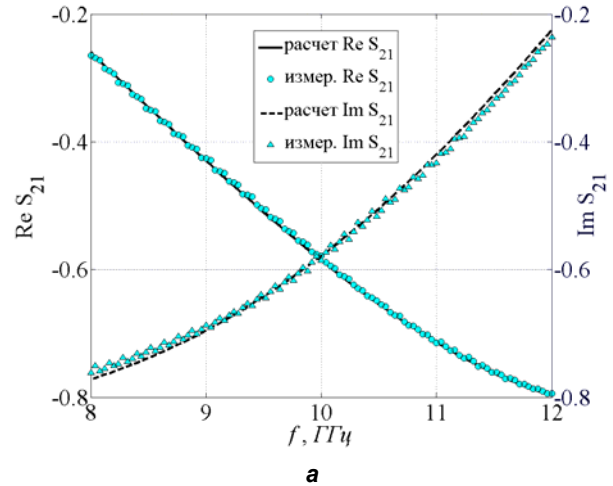
Измеренные частотные зависимости параметров комплексной матрицы рассеяния аппроксимировались формулами (4) и (5) по методу наименьших квадратов:

$$\min_{(\epsilon_{пл}, \text{tg} \delta)} \sum_k \sigma_k (S_k^{U3M} - S(f_k, \epsilon_{пл}, \text{tg} \delta))^2, \quad (6)$$

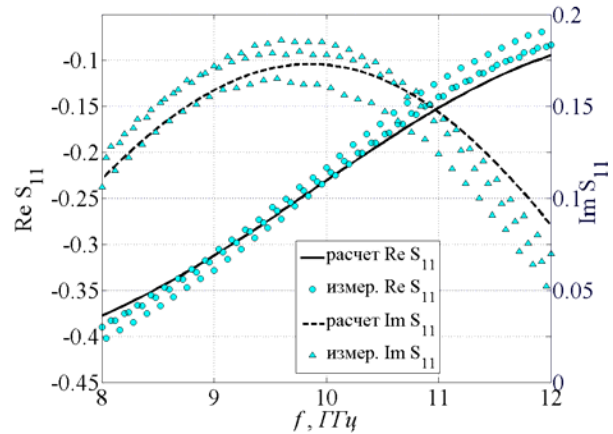
где σ_k – весовые множители, S_k^{U3M} – измеренное значение S-параметра на частоте f_k ; $S(f_k, \epsilon_{пл}, \text{tg} \delta)$ – значение S-параметра на той же частоте f_k , вычисленное для образца с комплексной диэлектрической проницаемостью сегнетоэлектрической пленки $\hat{\epsilon}_{пл} = \epsilon_{пл}(1 - j \text{tg} \delta)$, $\epsilon_{пл}$, $\text{tg} \delta$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс диэлектрических потерь сегнетоэлектрической пленки. Весовая функция используется для усиления влияния тех точек,

которые имеют наивысшую чувствительность и уменьшения влияния точек, подверженных большим погрешностям.

На рис.4 приведены измеренные и рассчитанные после решения задачи аппроксимации частотные зависимости комплексных коэффициентов прохождения и отражения для структуры, приведенной на рис.3.



а



б

Рис. 4. Измеренные и рассчитанные частотные зависимости комплексных коэффициентов прохождения (а) и отражения (б) для структуры, приведенной на рис. 3.

Относительная погрешность измерения диэлектрической проницаемости пленки может быть найдена как погрешность косвенных измерений:

$$\delta \epsilon_{пл} = \frac{1}{\left| \frac{\partial S}{\partial \epsilon_{пл}} \right|} \times \sqrt{(\delta S)^2 + \left(\Theta_d^S \delta d \right)^2 + \left(\Theta_l^S \delta l \right)^2 + \left(\Theta_h^S \delta h \right)^2 + \left(\Theta_{\epsilon_n}^S \delta \epsilon_n \right)^2} \quad (7)$$

где $\Theta_\beta^\alpha = \frac{\beta}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial \beta}$ – чувствительность параметра α к изменению параметра β , $\partial \beta$ – относитель-

ная погрешность измерения параметра β , S – измеряемый параметр матрицы рассеяния, ϵ_n – относительная диэлектрическая проницаемость подложки, h – толщина подложки.

Анализ выражения (7) показывает, что наибольший вклад в погрешность измерения относительной диэлектрической проницаемости оказывает погрешность измерения толщины пленки. Оценки показывают, что при измерении толщины пленки рефлектометром с абсолютной погрешностью 10 нм, относительная погрешность измерения диэлектрической проницаемости пленки толщиной 500 нм и проницаемостью 200 будет составлять около 10%. Погрешность растет с уменьшением толщины и относительной диэлектрической проницаемости пленки.

Погрешность измерения тангенса диэлектрических потерь пленки больше погрешности измерения относительной диэлектрической проницаемости из-за меньших чувствительностей изменения параметров матрицы рассеяния к изменению тангенса диэлектрических потерь пленки $\Theta_{tg\delta}^S$. Оценки показывают, что для пленок толщиной 500 нм с относительной диэлектрической проницаемостью 200 погрешность измерения тангенса диэлектрических потерь составляет более 30%.

Описанная методика была также апробирована для измерения сегнетоэлектрических пленок, нанесенных на полуизолирующую кремниевую подложку золь-гель методом. Некоторые результаты этих исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты исследования сегнетоэлектрических пленок, нанесенных на кремниевую подложку золь-гель методом

Состав сегнетоэлектрической пленки	Температура отжига, °С	Толщина пленки, 10^{-6} м	Относительная диэлектрическая проницаемость
Pb(Ti,Zr)O ₃	700	0.35	90±15
Pb(Ti,Zr)O ₃	800	0.35	120±15
(Ba,Sr)TiO ₃	650	0.2	125±30
(Ba,Sr)TiO ₃	750	0.2	250±40

Выводы

Предложен метод измерения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь сегнетоэлектрических пленок, нанесенных на подложку копланарной линии. Метод основан на двух-портовых измерениях частотной зависимости комплексной матрицы рассеяния отрезка копланарной линии с сегнетоэлектрической пленкой и аппроксимации этих зависимостей теоретическими, рассчитанными на основе метода конечных элементов.

Предложенная методика апробирована для сегнетоэлектрических пленок (Ba,Sr)TiO₃, нанесенных на подложки, изготовленные из монокристаллического MgO, методом лазерной абляции, а также пленок Pb(Ti,Zr)O₃ и (Ba,Sr)TiO₃, нанесенных на полуизолирующую кремниевую подложку золь-гель методом. Относительная погрешность метода для пленок толщиной 500 нм с относительной диэлектрической проницаемостью 200 составляет около десяти процентов для относительной диэлектрической проницаемости и около 30% для тангенса диэлектрических потерь.

Погрешность измерения возрастает с уменьшением толщины пленки и ее относительной диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь.

Литература

1. *Hidemi Takasu*. The Ferroelectric Memory and its Applications // Journal of Electroceramics.– 2000.–vol. 4.– pp. 327-338.
2. Tagantsev A.K., Sherman V.O., Astafiev K.F., Venkatesh J. and Setter N. Ferroelectric materials for tunable applications // Journal of Electroceramics.– 2003.– vol. 11.– pp. 5-66.
3. Shaw T.M., Trolier-McKinstry S., and McIntyre P.C.. The Properties of Ferroelectric Thin Films at Small Dimensions // Annu. Rev. Mater. Sci.– Vol. 30.– 2000.– pp. 263-98.
4. *Gevorgian S.S.*, and Kollberg E.L. Do we really need ferroelectrics in paraelectric phase only in electrically controlled microwave devices? // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2001.– vol. 49.– N11.– pp.2117-2123.
5. *Kim B.J.*, Baik S., Poplavko Y. and Prokopenko Y. Epitaxial BST thin film as microwave phase shifter // Integrated Ferroelectrics.– 2001.–Vol. 34.– pp.207-214.