

13

Характеризация свойств пленок титаната бария-стронция и управляемых элементов на их основе в диапазоне частот 1–60 GHz

© А.Г. Алтынников, А.Г. Гагарин, А.В. Тумаркин, И.В. Котельников

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,
Санкт-Петербург, Россия
Email: a.altynnikov@gmail.com

Поступило в Редакцию 7 марта 2019 г.

В окончательной редакции 7 марта 2019 г.

Принято к публикации 11 марта 2019 г.

Электрические свойства пленок титаната бария-стронция и перестраиваемых конденсаторов на их основе исследованы в широком диапазоне частот. Диэлектрические потери сегнетоэлектрических пленок на частотах до 30 GHz оценены на основе параметров конденсаторов, измеренных с использованием различных резонансных методик. Непосредственные измерения свойств пленок проведены на частоте 60 GHz с использованием методики открытого резонатора. На основе сравнения с полупроводниковыми аналогами показана перспективность использования тонкопленочных сегнетоэлектрических элементов в миллиметровом диапазоне длин волн.

Ключевые слова: сегнетоэлектрические пленки, титанат бария-стронция, сверхвысокочастотные применения.

В настоящее время одним из перспективных способов реализации высокой пропускной способности телекоммуникационных сетей является переход в миллиметровый диапазон длин волн, что определяет развитие соответствующей элементной базы, в частности электрически управляемых элементов. Традиционным выбором при конструировании перестраиваемых сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств являются полупроводниковые варакторы [1–3]. Однако существенное уменьшение добротности данных элементов с ростом частоты затрудняет их применение в миллиметровом диапазоне длин волн и стимулирует поиск альтернативных материалов. Одной из таких альтернатив может быть применение управляемых элементов на основе сегнетоэлектрических (СЭ) пленок [4]. Перспективность использования данных материалов на СВЧ обусловлена высокой нелинейностью, отсутствием дисперсии и сравнительно низким уровнем диэлектрических потерь на частотах вплоть до 100 GHz. СЭ-элементы могут быть реализованы в планарном исполнении на диэлектрической подложке [5] и в виде плоскопараллельной структуры металл–диэлектрик–металл (МДМ) [6], что обеспечивает возможность их применения как в мощных, так и в малосигнальных устройствах [7]. Традиционно считается, что сдерживающим фактором, ограничивающим использование сегнетоэлектриков, является сильная зависимость свойств материала от температуры по сравнению с таковой для полупроводников. Однако сегодня показано, что многослойные емкостные структуры на основе пленок титаната бария-стронция $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BSTO) с различным содержанием Ba в слоях демонстрируют температурный коэффициент емкости порядка $10^{-4} K^{-1}$ в широком температурном диапазоне, что

сопоставимо с данными для полупроводниковых варакторов [8].

Характеризация управляемых элементов на СВЧ представляет собой сложную задачу, так как не существует универсальной методики, позволяющей оценить добротность в широком частотном диапазоне с достаточной точностью. Многие авторы приводят данные о добротности емкостных СЭ-структур только в частотном диапазоне 1 kHz–1 MHz, что не позволяет сделать вывод о применимости полученных пленок на более высоких частотах из-за нелинейной зависимости потерь от частоты. Авторы немногочисленных работ, в которых исследованы свойства СЭ-элементов на СВЧ с помощью зондовых станций, приводят адекватные данные по добротности на частотах до 20 GHz, на более высоких частотах погрешность измерения сопоставима со значениями измеряемой величины [4,9–11].

В связи с перспективностью использования сегнетоэлектриков в СВЧ-диапазоне актуальной задачей является непосредственная характеристика параметров СЭ-элементов планарных и МДМ-конструкций на частотах свыше 1 GHz. Для решения этой задачи в настоящей работе использованы резонансные методики измерений, что позволило обеспечить высокую точность определения параметров СВЧ-элементов и СЭ-пленок в широком диапазоне частот. Проведено сравнение полученных данных с характеристиками промышленно выпускаемых полупроводниковых варакторов.

Исследуемые структуры формировались на подложках из монокристаллического сапфира (Al_2O_3 , r -срез) толщиной 0.5 mm. Для МДМ-конденсаторов платиновый слой нижнего электрода толщиной 100 nm осаждался на подложку посредством магнетронного распыления платиновой мишени в атмосфере аргона при темпе-

ратуре 450°C. Формирование топологии Pt-электрода проводилось с помощью фотолитографии и ионного травления. Сегнетоэлектрические пленки наносились на сформированный нижний электрод методом высокочастотного магнетронного распыления керамических мишеней BSTO ($x = 0.3, 0.5, 0.9$) в атмосфере кислорода при давлении 2 Па. Температура подложки в процессе осаждения пленок составляла 800°C [12]. В планарных и однослойных МДМ-структурах использовалась пленка BSTO состава $x = 0.3$, который демонстрирует наилучшее соотношение управляемости и СВЧ-потерь [13]. При формировании многослойных МДМ-элементов использовались слои составов $x = 0.5$ и 0.9 для достижения термостабилизации параметров структур в диапазоне температур 250–400 К [8]. Толщина пленки BSTO для планарных конденсаторов составляла 700 nm, для МДМ-структур — 300 nm (многослойные структуры формировались из слоев толщиной 200 и 150 nm для составов $x = 0.5$ и 0.9 соответственно). После осаждения СЭ-пленки при формировании МДМ-конденсаторов проводилась ее литография путем химического травления в смеси кислот $\text{HF}-\text{HNO}_3$. Верхние электроды были изготовлены путем термического нанесения 1 μm пленки Cu с адгезионным подслоем хрома. Размеры рабочей области МДМ-конденсаторов составляли $4 \times 10 \mu\text{m}$; для планарных конденсаторов длина зазора составляла 0.4 mm, а ширина зазора — 3 μm .

Для проведения экспериментальных исследований СВЧ-параметров сегнетоэлектрических пленок и элементов на их основе применялись резонансные методики, обеспечивающие высокую точность измерений за счет использования специальных измерительных макетов в разных поддиапазонах частот. На частотах порядка 1 GHz измерения проводились с помощью короткозамкнутого на концах симметричного полоскового СВЧ-резонатора [14]; на 10 GHz применялся полосковый резонатор на подвешенной подложке [15]; на частоте 30 GHz использовался метод саморезонанса конденсатора [16]. На частоте 60 GHz были проведены непосредственные измерения свойств пленки BSTO с использованием методики открытого резонатора [16]. Емкость конденсаторов C измерялась на частотах порядка 1 и 10 GHz и использовалась затем при измерениях на частоте 30 GHz ввиду отсутствия дисперсии. Управляемость конденсаторов рассчитывалась как отношение емкостей при нулевом и максимальном приложенном напряжении управления

$$n = C(0\text{V})/C(U_{\text{max}}).$$

На рис. 1 представлены зависимости емкости исследуемых конденсаторов, нормированной на начальную емкость C_0 , от величины управляющего напряжения, измеренные на частоте 1.8 GHz. Видно, что величина управляемости составляет $n = 2$ и более как для планарных, так и для МДМ-элементов, что указывает на высокое качество СЭ-слоев. Напряженности поля в зазоре

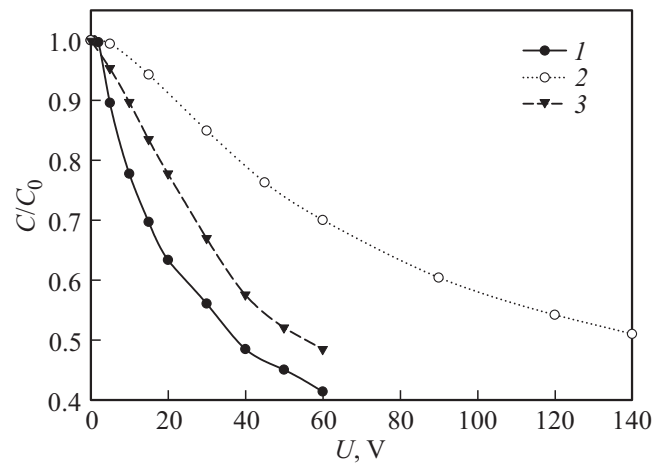


Рис. 1. Зависимости емкости от напряжения для сегнетоэлектрических конденсаторов различной конструкции. 1 — МДМ-конденсатор, 2 — планарный конденсатор, 3 — двухслойный МДМ-конденсатор.

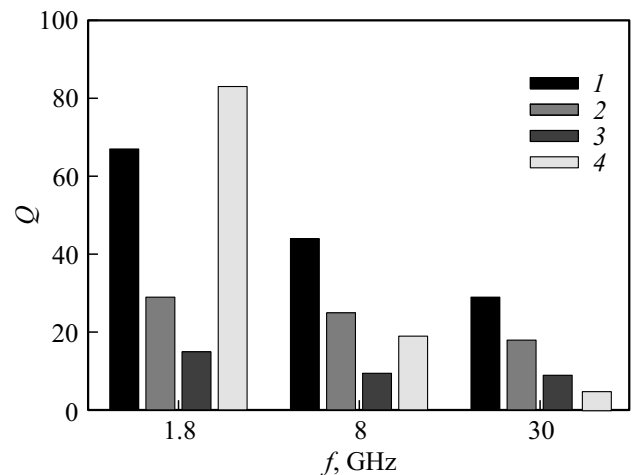


Рис. 2. Добротности перестраиваемых емкостных СВЧ-элементов на различных частотах. 1 — планарный конденсатор, 2 — МДМ-конденсатор, 3 — двухслойный МДМ-конденсатор, 4 — полупроводниковый варактор.

200 $\text{V}/\mu\text{m}$ соответствуют управляющие напряжения 60 и 140 V для МДМ- и планарных элементов соответственно. На рис. 2 представлена гистограмма добротностей ($Q = 1/\tan \delta$) сегнетоэлектрических конденсаторов различной конструкции в частотном диапазоне 1–30 GHz в сравнении с добротностями полупроводниковых варакторов производства фирмы SkyWorks [17]. Отметим, что уже на частоте 8 GHz планарные СЭ-элементы превосходят полупроводниковые аналоги по добротности более чем в 2 раза, а на 30 GHz преимущество планарных элементов над варакторами возрастает до 5 раз, МДМ-элементов — до 3 раз. Очевидно, что применение сегнетоэлектрических элементов на частотах 10 GHz и выше перспективно ввиду более высокой добротности.

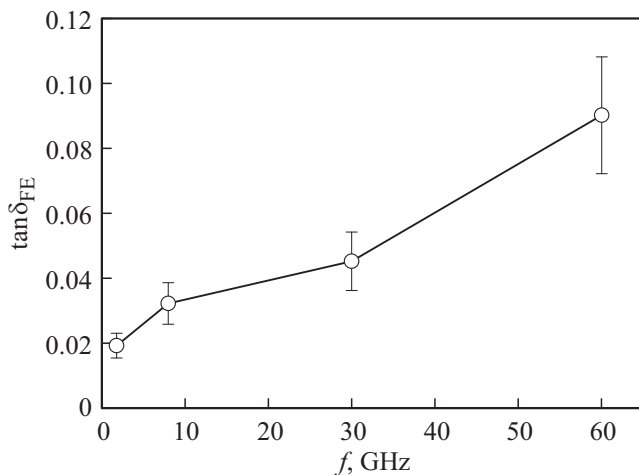


Рис. 3. Частотная зависимость величины диэлектрических потерь в сегнетоэлектрической пленке BSTO состава $x = 0.3$.

В общем случае добротность СЭ-конденсатора складывается из потерь в металлических электродах, сегнетоэлектрической пленке и подложке. Для разработки сегнетоэлектрических СВЧ-элементов необходимо понимание вклада металлических электродов [6] и СЭ-пленки в суммарные потери конденсатора.

Расчет СВЧ-потерь непосредственно СЭ-пленки в частотном диапазоне 1–30 GHz производился на основе измеренных параметров планарных СЭ-конденсаторов. С точки зрения эквивалентной схемы конденсатора на СВЧ сопротивление металлических электродов может быть представлено последовательным включением резистора. Исходя из удельного сопротивления пленки меди $3 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, ее толщины $1 \mu\text{m}$ и размеров электродов планарного конденсатора $0.5 \times 0.4 \text{ mm}$ сопротивление металлических электродов может быть оценено как $7.5 \cdot 10^{-2} \Omega$. Такое сопротивление при использовании последовательной схемы замещения для измеренной емкости конденсатора $C = 0.38 \text{ pF}$ соответствует СВЧ-потерям $\tan \delta_M = R\omega C = 2 \cdot 10^{-4}$ (добротность $Q_M = 5000$) на частоте 1 GHz и $\tan \delta_M = 6 \cdot 10^{-3}$ на частоте 30 GHz ($Q_M = 160$). По сравнению с измеренными величинами полных добротностей элементов Q_Σ потерями в металлических электродах можно пренебречь. Сегнетоэлектрическая пленка и диэлектрическая подложка в планарном конденсаторе, согласно методу частичных емкостей [5], эквивалентно включаются параллельно как конденсаторы с емкостями C_{FE} и C_S соответственно, при этом энергия электрического поля распределяется между пленкой и подложкой. Диэлектрические потери в подложке сапфира относительно малы и составляют порядка $\tan \delta_S = 10^{-4}$, поэтому их также можно не учитывать при рассмотрении полной добротности конденсатора. Таким образом, добротность конденсатора обусловлена исключительно потерями в сегнетоэлектрическом слое, которые можно определить

как

$$\tan \delta_{FE} = \frac{1}{Q_\Sigma} \frac{C_\Sigma}{C_{FE}}.$$

Здесь $C_\Sigma = C_{FE} + C_S$ — полная емкость конденсатора, а емкость сегнетоэлектрического слоя $C_{FE} = C_\Sigma - C_S$, где C_S рассчитывается по методу частичных емкостей [7]. Для приведенных топологических размеров планарного конденсатора $C_S = 0.08 \text{ pF}$. Таким образом, для измеренной емкости конденсатора $C_\Sigma = 0.38 \text{ pF}$ диэлектрические потери пленки определяются как $\tan \delta_{FE} = 1.27(1/Q_\Sigma)$. На рис. 3 представлена частотная зависимость потерь в сегнетоэлектрической пленке ($x = 0.3$) в диапазоне от 1 до 60 GHz, где диэлектрические потери на частоте 60 GHz определены методом открытого резонатора.

Таким образом, как показали результаты экспериментальных исследований, перестраиваемые конденсаторы на основе сегнетоэлектрических пленок BSTO обладают высокой добротностью при достаточной управляемости в СВЧ-диапазоне. СЭ-элементы составляют конкуренцию полупроводниковым аналогам по добротности на частотах выше 10 GHz, а многослойные термостабильные структуры — на частотах от 30 GHz. Незначительный рост диэлектрических потерь в сегнетоэлектрической пленке при увеличении частоты до 60 GHz позволяет говорить о высоком потенциале использования сегнетоэлектрических элементов в перестраиваемых устройствах миллиметрового диапазона длин волн.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10156).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Veneri F., Costanzo S., Di Massa G.* // IEEE Trans. Antennas Propagation. 2013. V. 61. N 2. P. 635–645.
- [2] *Ma Q., Leenaerts D., Mahmoudi R.* A 12 ps true-time-delay phase shifter with 6.6% delay variation at 20–40 GHz // 2013 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symp. (RFIC). IEEE, 2013. P. 61–64.
- [3] *Kamoda H., Iwasaki T., Tsumochi J., Kuki T.* 60 GHz electrically reconfigurable reflect array using pin diode // 2009 IEEE MTT-S International Microwave Symp. Digest. IEEE, 2009. P. 1177–1180.
- [4] *Vorobiev A., Rundqvist P., Khamchane K., Gevorgian S.* // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. N 15. P. 3144–3146.
- [5] *Вендик О.Г., Зубко С.П., Никольский М.А.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 4. С. 1–7.
- [6] *Гайдуков М.М., Гагарин А.Г., Козырев А.Б., Разумов С.В., Тумаркин А.В., Алтынников А.Г.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 13. С. 50–55.
- [7] *Вендик О.Г.* // ФТТ. 2009. Т. 51. В. 7. С. 1441–1448.

- [8] Гайдуков М.М., Тумаркин А.В., Гагарин А.Г., Козырев А.Б. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 8. С. 37–43.
- [9] Houzet G., Burgnies L., Velu G., Carru J.C., Lippens D. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. N 5. P. 053507.
- [10] Ghalem A., Ponchel F., Remiens D., Legier J.F., Lasri T. // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2013. V. 60. N 5. P. 880–887.
- [11] De Paolis R., Coccetti F., Payan S., Maglione S., Guégan G. Characterization of ferroelectric BST MIM capacitors up to 65 GHz for a compact phase shifter at 60 GHz // 2014 44th European Microwave Conf. IEEE, 2014. P. 492–495.
- [12] Тумаркин А.В., Альмяшев В.И., Разумов С.В., Гайдуков М.М., Гагарин А.Г., Алтынников А.Г., Козырев А.Б. // ФТТ. 2015. Т. 57. В. 3. С. 540–544.
- [13] Razumov S.V., Tumarkin A.V., Gaidukov M.M., Gagarin A.G., Kozurev A.B., Vendik O.G., Ivanov A.V., Buslov O.U., Keys V.N., Sengupta L.C., Zhang X. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. N 9. P. 1675–1677.
- [14] Гайдуков М.М., Козырев А.Б., Рубан А.С. // Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20. № 12. С. 2588–2591.
- [15] Kozurev A.B., Keis V.N., Koepf G., Yandrofski R., Soldatenkov O.I., Dudin K.A., Dovgan D.P. // Microelectron. Eng. 1995. V. 29. N 1-4. P. 257–260.
- [16] Kozurev A., Buslov O., Keis V., Dovgan D., Kotelnikov I., Kulik P., Sengupta L., Chiu L., Treadway B., Kaydanova T., Perkins J.D., Alleman J., Ginley D.S. // Integr. Ferroelectrics. 2003. V. 55. N 1. P. 895–903.
- [17] URL: http://www.skyworksinc.com/Products_Diodes.aspx