

А.В. Тумаркин, М.М. Гайдуков, А.Г. Гагарин, А.Б. Козырев
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Сегнетоэлектрические МДМ конденсаторы для СВЧ применений

Представлены характеристики управляемый сегнетоэлектрических конденсаторов на основе плёнок STO и BSTO для использования в СВЧ устройствах. Рассмотрены параметр качества конденсаторов, в котором учтено напряжение управления, не вызывающее замедленной релаксации. Параметр качества представленных конденсаторов при напряжении управления 10 В достиг 1400 при управляемости 1.7.

Ключевые слова: сегнетоэлектрические плёнки, управляемый конденсатор, параметр качества

Интерес к использованию нелинейных конденсаторов на основе сегнетоэлектрических пленок в параэлектрической фазе в качестве элементов управления устройств СВЧ устойчиво наблюдается в работах последних лет [1,2]. При этом имеется качественное различие между конденсаторами планарной конструкции, параметры которых позволяют успешно использовать их в устройствах высокой мощности [3], и конденсаторами плоскопараллельной (МДМ) конструкции, которые призваны конкурировать с традиционной элементной базой малосигнальных СВЧ устройств.

В настоящей работе анализируется перспективность применения МДМ конденсаторов на основе плёнок твердого раствора титаната бария-стронция $Ba_{0.3}Sr_{0.7}TiO_3$ (BSTO) и на основе плёнок титаната стронция $SrTiO_3$ (STO) в устройствах СВЧ с импульсным управлением. Анализ основан на исследовании основных параметров BSTO конденсаторов: управляемости K , добротности Q , напряжения управления $U_{упр}$, порогового напряжения $U_{пор}$, при котором становится заметным эффект неполного восстановления ёмкости до равновесного значения после выключения напряжения.

Комплексным параметром, определяющим эффективность использования нелинейных конденсаторов в СВЧ устройствах, является коммутационный параметр качества q [4, 5]

$$q = Q_{\min} Q_{\max} (K-1)^2 / K,$$

где $K = C_0/C(U)$ – управляемость конденсатора, C_0 и $C(U)$ – ёмкости конденсатора, а Q_{\min} и Q_{\max} – минимальная и максимальная добротности конденсатора при управлении, соответственно. Ранее [6] на основе исследования планарных конденсаторов было показано, что максимальное значения параметра качества обеспечивает плёнка BSTO состава $x = 0.3$.

Кроме того, как было показано в [7], МДМ конденсаторы на основе пленок BSTO проявляют более выраженную по сравнению с планарными структурами медленную релаксацию ёмкости после выключения управляющего напряжения, которая является серьёзной проблемой при их использовании в устройствах с импульсным управлением.

Исследованные конденсаторы формировались на подложках из монокристаллического сапфира (Al_2O_3 , r-срез) толщиной 0.5 мм. Нижний платиновый (Pt) электрод толщиной 100 нм осаждался на подложку магнетронным распылением, платиновой мишени в атмосфере аргона при температуре 450°C. Формирование топологии Pt электрода проводилось фотолитографией и ионным травлением. Пленки BSTO наносились на сформированный нижний электрод методом высокочастотного магнетронного распыления керамической мишени соответственного состава в атмосфере кислорода при давлении 2 Па. Перед процессом осаждения проводилось предраспыление мишени в стороне от подложкодержателя в течении 30 мин с целью очистки поверхности мишени. Температура подложек составляла 675°C, что обеспечивало стехиометрический перенос состава мишени на подложку. Толщина пленки BSTO составляла 300 нм. Сегнетоэлектрические плёнки, осажденные при данной температуре, имели поликристаллическую структуру и содержали блоки размером (20-40) нм с ориентацией (100), (111) и (110) по нормали к поверхности подложки. После осаждения СЭ плёнки проводилась её литография путём химического травления в смеси кислот HF-HNO_3 . Верхние электроды были изготовлены термическим нанесением 1 мкм плёнки Cu с адгезионным подслоем хрома. Размеры рабочей области конденсатора (перекрытия) 5×10 мкм². Зазор между верхними электродами конденсатора 5 мкм.

Вольт-фарадные характеристики и добротность конденсаторов на частоте $f = 1.5$ ГГц измерялись резонансным методом [8]. Управляющее напряжение, $U_{\text{упр}} = -20 \text{ В} \dots +20 \text{ В}$, прикладывалось к конденсатору в течение 1 с. Параметры конденсатора (C , Q) измерялись до приложения напряжения, под действием напряжения и через 1 с после выключения напряжения замыканием электродов через сопротивление 100 кОм.

Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) исследованных конденсаторных структур показаны на рисунке.1 а. ВФХ симметричны. Ось симметрии сдвинута относительно $U = 0$ на величину $U_{\text{см}}$ в сторону положительного потенциала на нижнем (Pt) электроде. Величина C_{max} превышала C_0 не более чем на 3% (вставка на рис.1а). Одинаковый сдвиг оси симметрии наблюдался для образцов обоих исследованных составов.

На рисунке 1 б показаны зависимости относительного дефицита емкости $\Delta C_{r0}/C_0 = (C_0 - C_{r0}) / C_0$ от амплитуды импульса управляющего напряжения (полярность указана относительно нижнего Pt электрода). Схема отклика ёмкости в зависимости от времени показана на вставке к рисунку. После выключения напряжения ёмкость не возвращается к исходному значению C_0 , а принимает значение остаточной емкости $C_{r0} = C_0 - \Delta C_{r0}$. Затем остаточная емкость $C_r(t)$ релаксирует, стремясь к начальной величине C_0 . Из рисунка 1 б видно, что появление дефицита ёмкости после выключения напряжения имеет пороговый характер и зависит от полярности напряжения. На представленных зависимостях хорошо видны пороговые напряжения при отрицательной полярности, $U_{\text{пор}}^- \approx -10 \text{ В}$, и отсутствие порога, $U_{\text{пор}}^+ \approx 0 \text{ В}$, при положительной полярности. Из рисунка 1 б следует, что для безинерционного управления элементами на основе исследованных МДМ конденсаторов может быть использовано напряжение отрицательной полярности диапазона $U_{\text{упр}} = 0 \dots -10 \text{ В}$. В этом диапазоне после

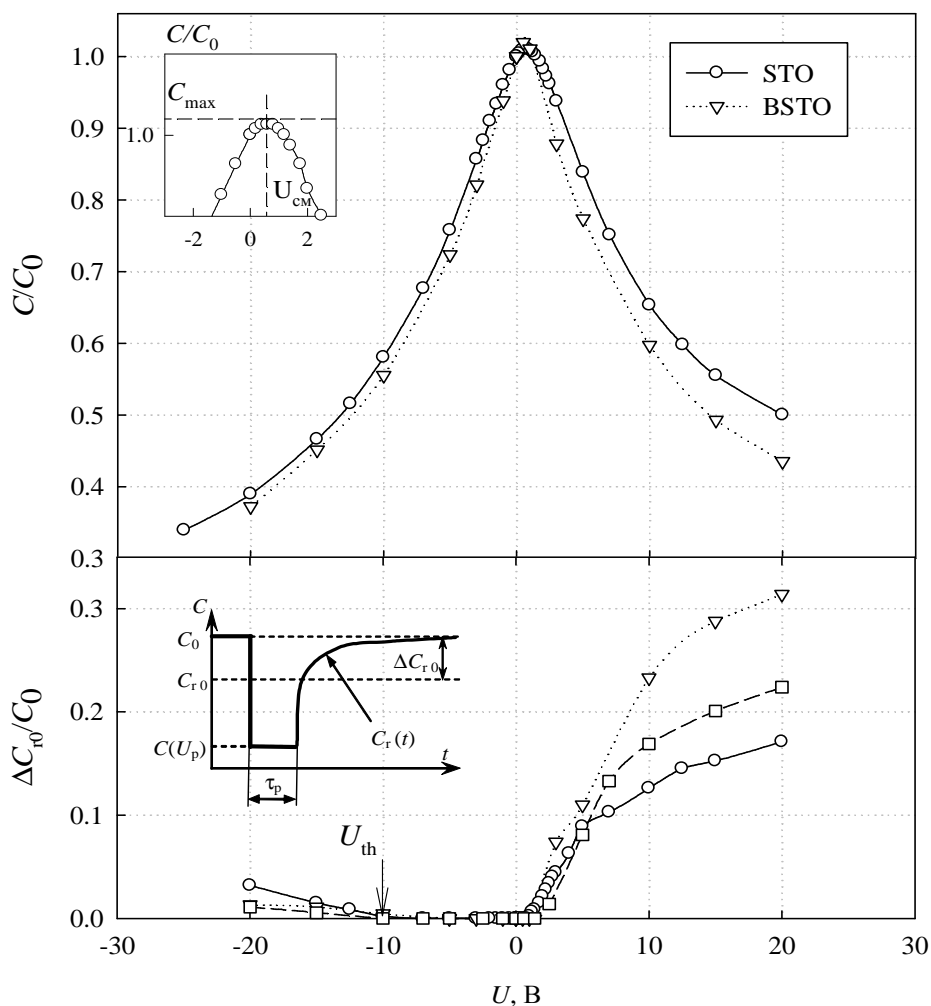


Рисунок 1

выключения напряжения ёмкость полностью восстанавливается до значения C_0 . Очевидно, что максимальная управляемость конденсатора должна определяться как $K = C_0/C(U_{пор}^-)$. В этом же диапазоне напряжений необходимо определять добротность и параметр качества конденсатора.

На рисунке 2 приведены зависимости добротности от управляющего напряжения, измеренные при комнатной температуре для тех же МДМ конденсаторов. Использование BSTO плёнок приближает температуру фазового перехода к рабочей температуре, что существенно снижает добротность при одновременном увеличении управляемости.

Основные результаты исследования сведены в Таблицу 1. Все приведенные в Таблице значения параметров соответствуют диапазону напряжения (-10...0) В.

Таблица 1

Состав	K	Q_{min}	Q_{max}	q
STO	1.7	50	90	1400
BSTO	1.8	45	65	1150

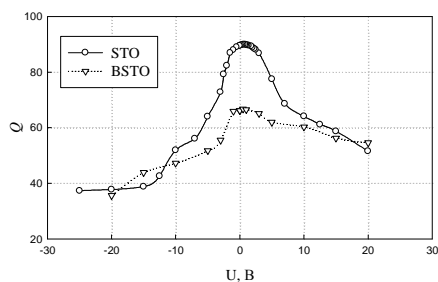


Рисунок 2

Из данных Таблицы следует, что параметр качества МДМ конденсаторов на основе пленок BSTO уменьшается за счёт снижения добротности, которое не компенсируется увеличением управляемости. Наибольшим параметром качества из исследованных пленок характеризуются МДМ конденсаторы на основе STO пленок. Величина коммутационного параметра качества, $q \approx 1400$, обеспечивает возможность их использования в качестве управляющих элементов перестраиваемых СВЧ фильтров и фазовращателей диапазона частот 1÷2 ГГц.

Библиографический список

1. Gevorgian S. *Ferroelectrics in Microwave Devices, Circuits and Systems: Physics, Modeling, Fabrication and Measurements*, Engineering materials and processes (Springer, 2009).
2. Acikel B. A new high performance phase shifter using $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ thin films / B. Acikel, T. R. Taylor, P. J. Hansen, J. S. Speck, and R. York, *Microwave and Wireless Components Letters*, IEEE 12, 237 (2002).
3. Вендик О.Г. Сегнетоэлектрики находят свою “нишу” среди управляющих устройств СВЧ // ФТТ. – 2009. Т.51, вып.7. С.1441-1445.
4. Вендик И.Б. Коммутационное качество электрически управляемых СВЧ-компонентов / В.В. Плескачев, И.Б. Вендик // ПЖТФ, 2003, том 29, выпуск 24. С.15-21
5. Vendik O.G. Commutation Quality Factor as a Working Tool for Optimization of Microwave Ferroelectric Devices / O. G. Vendik, I. B. Vendik, V. O. Sherman // *Integrated Ferroelectrics*. –2002. –V.43, Is.1. P. 81-89.
6. Razumov S.V. Characterization of quality of $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ thin film by the commutation quality factor measured at microwaves / commutation quality factor measured at microwaves / S.V. Razumov, A.V. Tumarkin, M.M. Gaidukov et al. // *Appl. Phys. Lett.* 81, 1675 (2002).
7. Козырев А.Б. Влияние контактов металл-сегнетоэлектрик на формирование объемного заряда в сегнетоэлектрических тонкопленочных конденсаторах /. Козырев А.Б., Гайдуков М.М., Гагарин А.Г. и др. // Письма в Журнал технической физики. 2009. Т. 35. № 13. С. 1-7.
8. Гайдуков М.М. Измерение ёмкости и диэлектрических потерь планарных конденсаторов на сегнетоэлектрической плёнке в диапазоне СВЧ / М.М. Гайдуков, А.Б. Козырев, А.С. Рубан и др. // *Радиотехника и электроника*. -1975. -Т.20, вып.12. -С.2588-2591.