

05

Электрофизические свойства тонких пленок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$, выращенных на подложках диоксида кремния

© С.В. Разумов, А.В. Тумаркин, М.В. Сыса, А.Г. Гагарин

С.-Петербургский государственный электротехнический университет
E-mail: thinfilm@eltech.ru

Поступило в Редакцию 6 августа 2002 г.

Исследованы тонкие сегнетоэлектрические пленки соединения титаната бария-стронция ($Ba_xSr_{1-x}TiO_3$), выращенные на подложках из плавленного кварца (SiO_2) методом высокочастотного магнетронного распыления. Установлены зависимости коэффициента перестройки и уровня диэлектрических потерь от температуры синтеза и толщины полученных пленок, а также проведены сравнительные исследования электрических характеристик полученных пленок с пленками, выращенными на подложках поликристаллического оксида алюминия (Al_2O_3).

В последнее время резко возрос интерес к сегнетоэлектрикам как к материалу для создания электронных приборов СВЧ-диапазона [1,2]. Этот интерес обусловлен сильной зависимостью диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрических материалов от приложенного электрического поля и относительно низким уровнем диэлектрических потерь в СВЧ-диапазоне [3,4]. Вышеназванные свойства сегнетоэлектриков делают перспективным их применение в качестве основы для таких СВЧ-устройств, как варакторы, фазовращатели, перестраиваемые фильтры, фазированные антенные решетки, работающие при комнатной температуре [5].

Для создания приборов СВЧ-диапазона на базе пленочных сегнетоэлектриков необходимы пленки, обладающие одновременно достаточно сильной зависимостью диэлектрической проницаемости от приложенного поля и низкими потерями в СВЧ-диапазоне [6]. Одним из наиболее перспективных на сегодня материалов по высокому уровню диэлектрической нелинейности и низкому уровню диэлектрических потерь является состав $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BSTO) [4,7]. На базе BSTO пленок реализованы такие СВЧ-приборы, как фазовращатели [8,9], ведется активная разработка фильтров, линий задержки и др.

Большое значение для работы СВЧ-устройств имеет выбор диэлектрической подложки, на которую наносится BSTO пленка. Наряду с широко используемыми подложками из монокристаллического и поликристаллического оксида алюминия [6,7] на СВЧ представляется перспективным использование кварцевых подложек из-за низкого уровня диэлектрических потерь и стабильно малого значения диэлектрической проницаемости. Низкое значение диэлектрической проницаемости кварцевых подложек (по сравнению с сапфиром и поликором) позволяет в более широком диапазоне варьировать геометрические размеры СВЧ-элементов, что значительно облегчает конструирование приборов, работающих на частотах свыше 30 GHz. При этом задача нанесения сегнетоэлектрических пленок на подложки из кварца до сих пор не решена.

Данная работа посвящена исследованию электрофизических свойств BSTO пленок, полученных методом ионно-плазменного распыления на подложках поликристаллического оксида алюминия (поликора) и плавленного кварца.

Пленки титаната бария-стронция были получены ВЧ магнетронным распылением керамической мишени $Ba_{0,3}Sr_{0,7}TiO_3$ диаметром 76 mm. Выбор состава распыляемой мишени сделан на основе результатов предыдущих исследований, позволивших определить область технологических параметров для получения сегнетоэлектрических пленок с высокими электрофизическими характеристиками, достаточными для СВЧ-применений [7]. Осаждение пленок проводилось на подложки кварца и поликора одновременно. Температура подложек контролировалась с помощью термпары, закрепленной под подложкодержателем, температура которого изменялась в диапазоне от 700 до 905°C. Время осаждения пленок варьировалось от 100 до 300 min. Толщина пленок, измеренная профилометром, составила от 3500 до 10 500 Å

соответственно. Скорость роста пленок составила, таким образом, $35 \text{ \AA}/\text{min}$. Расстояние мишень-подложка составляло 40 mm . В качестве рабочего газа использовался чистый кислород. После осаждения образцы охлаждались в кислороде при атмосферном давлении со скоростью порядка $2\text{--}3^\circ\text{C}/\text{min}$. Перед процессом осаждения проводилось предраспыление мишени в стороне от подложкодержателя в течение 30 min .

Для исследования электрофизических характеристик на поверхности пленок методом фотолитографии были сформированы планарные конденсаторы с медными электродами. Линейные размеры конденсаторов были следующие: толщина электродов — $0.5 \mu\text{m}$, зазор между электродами — $6 \mu\text{m}$, длина зазора — 0.8 mm . Электрические характеристики: управляемость (выраженная через коэффициент перестройки $n = C(0)/C(E_{\text{max}})$) и уровень диэлектрических потерь ($\tan \delta$) измерялись на частоте 1 GHz при комнатной температуре. Напряжение смещения, прикладываемое к конденсаторам U_1 , менялось в диапазоне $0 \div 300 \text{ V}$, что соответствовало напряженности поля в зазоре $E = 0 \div 50 \text{ V}/\mu\text{m}$.

Температура Кюри исследуемых пленок составила $\sim 160^\circ\text{C}$, что близко к температуре Кюри для объемных образцов. Диэлектрическая проницаемость в нулевом поле, рассчитанная согласно [10], составила от 230 до 340 для пленок на кварцевых подложках и от 320 до 450 для пленок на поликоре.

На рис. 1 *a, b* представлены графические зависимости управляемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры синтеза для полученных пленок, выращенных на подложках кварца и поликора. Информация для пленок BSTO на подложках из поликора приведена для сравнения, так как поликор является подложкой, на которой качественные пленки BSTO с высокими электрофизическими характеристиками уже получены [7]. Наблюдается тенденция увеличения управляемости и уровня диэлектрических потерь с ростом температуры как для кварца, так и для поликора. Интересен тот факт, что аналогичная тенденция наблюдается для BSTO пленок, выращенных на подложках сапфира [6,7], что позволяет рассчитывать на существование общей закономерности роста BSTO пленок на исследованных в данной работе и в [7] подложках. Для пленок, выращенных на кварцевых подложках, управляемость достигает максимального значения (1.95) при температуре осаждения пленок 905°C . Увеличение температуры

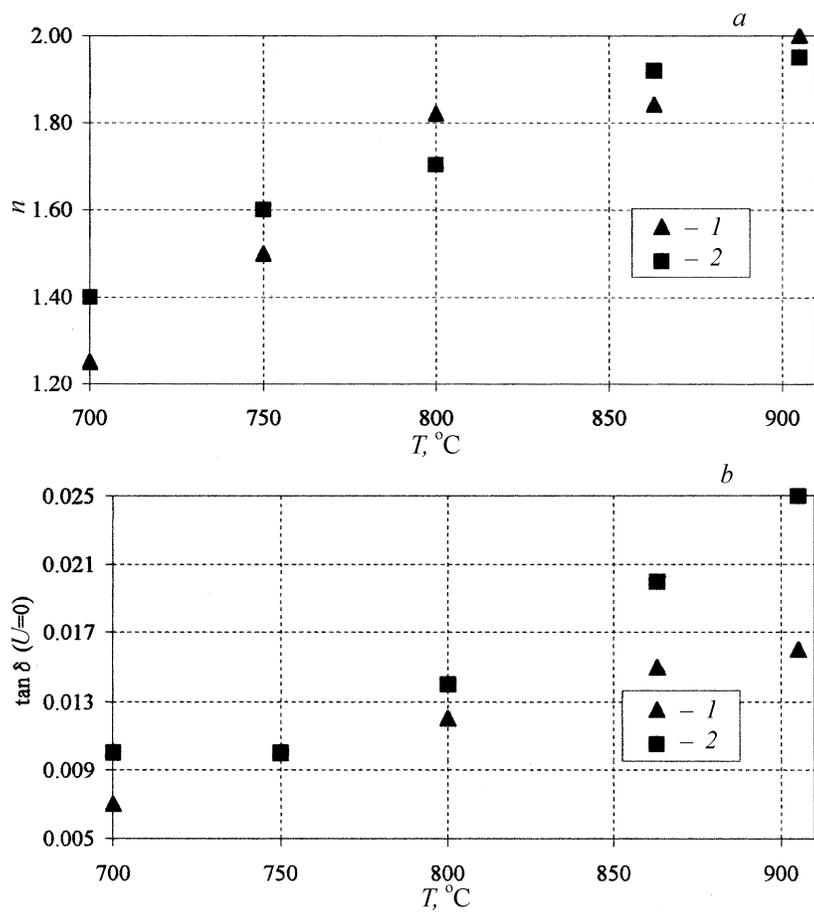


Рис. 1. Зависимость коэффициента перестройки (*a*) и тангенса угла диэлектрических потерь (*b*) от температуры синтеза BSTO пленок: 1 — поликор; 2 — кварц.

синтеза свыше 905°C представляется целесообразным только с точки зрения повышения управляемости, так как уровень потерь (0.025 на частоте 1 GHz) для пленок на кварце при температуре синтеза 905°C уже превышает допустимый для СВЧ-применений [6].

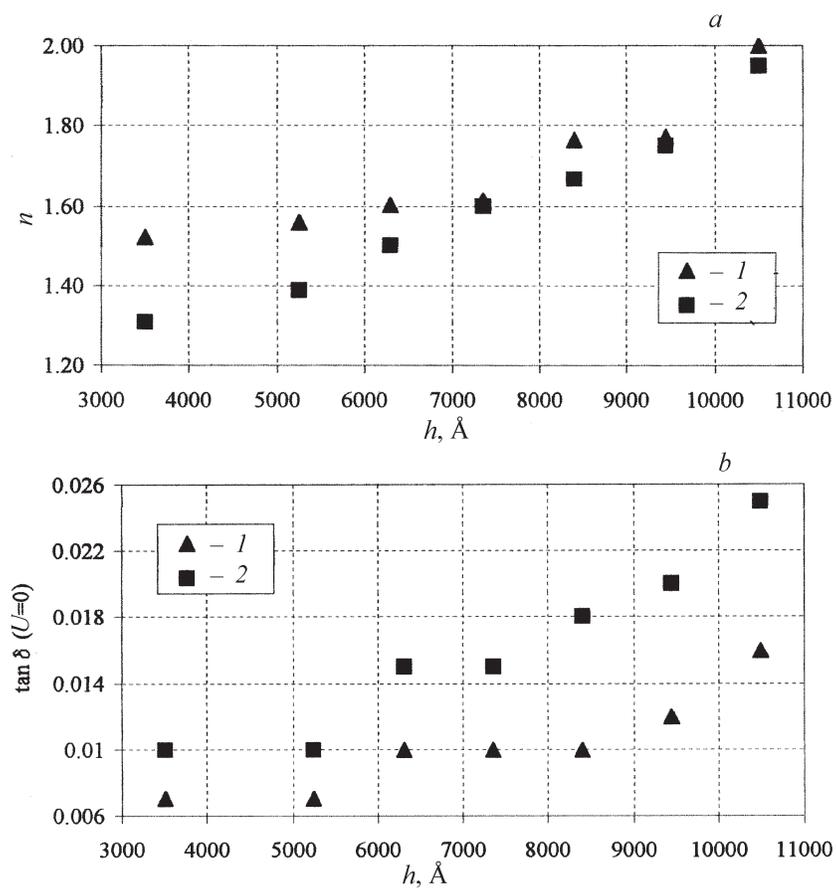


Рис. 2. Зависимость управляемости (а) и угла диэлектрических потерь (b) от толщины BSTO пленок.

На рис. 2а, b приведены зависимости управляемости и диэлектрических потерь от толщины пленок (h), полученных при температуре синтеза 905°C . Видно, что с увеличением толщины пленки потери и управляемость растут. При этом потери BSTO пленок на кварцевой подложке выше потерь пленок на подложке из поликора. Наиболее

вероятными причинами завышенных потерь на кварце по сравнению с поликором являются невысокое структурное качество BSTO пленки, обусловленное аморфной кварцевой подложкой, а также значительная разница в температурных коэффициентах линейного расширения кварцевой подложки и сегнетоэлектрической пленки. Так, температурный коэффициент линейного расширения поликора ($75 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) близок по значению к температурному коэффициенту линейного расширения BSTO пленки ($94 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), поэтому при нагревании или охлаждении пленка деформируется незначительно и не образует дополнительных дефектов. В отличие от поликора, температурный коэффициент расширения кварца равен $5.5 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, т.е. более чем на порядок меньше, чем у BSTO пленки [11]. В результате при охлаждении в пленке на кварцевой подложке появляются трещины, отчетливо наблюдаемые как в оптический микроскоп, так и при измерении толщины пленки профилометром, что ведет к образованию дополнительных дефектов и, как следствие, к увеличению потерь в пленках, выращенных на кварцевых подложках. Однако следует отметить, что трещины в пленках на кварце возникают при толщине BSTO пленок более $10\,000 \text{ \AA}$.

В результате проведенных исследований установлено, что коэффициент перестройки и уровень диэлектрических потерь растут с увеличением температуры синтеза пленок, полученных как на кварцевых, так и на поликоровых и сапфировых подложках. Исследования при температуре синтеза, позволяющей получить наибольшую управляемость пленок, показали, что потери пленок, выращенных на кварцевой подложке заметно выше, чем потери пленок на подложке из поликора. Основной причиной такого поведения потерь, по нашему предположению, является аморфная подложка, ограничивающая структурное качество пленки, и разная величина температурного коэффициента линейного расширения кварцевой подложки и сегнетоэлектрической пленки. Температурный коэффициент линейного расширения кварца более чем на порядок меньше, чем коэффициент линейного расширения BSTO пленки, поэтому при охлаждении в пленке образуются трещины, что ведет к заметному увеличению потерь.

Возможным решением проблемы совмещения двух материалов (кварцевой подложки и BSTO пленки) с разными свойствами может быть использование буферного слоя диэлектрика, согласующего оба материала. Диоксид церия (CeO_2) имеет кубическую симметрию с постоянной $a = 5.420 \text{ \AA}$, что хорошо согласуется с решеткой титаната

бария–стронция. Кроме того, температурный коэффициент линейного расширения диоксида церия ($85 \times 10^{-7} \text{C}^{-1}$) при $T = 300 \text{ K}$ близок по значению к температурному коэффициенту линейного расширения титаната бария–стронция.

Несмотря на то что уровень потерь BSTO пленок на кварцевых подложках выше по сравнению с пленками на поликоре, пленки толщиной до $10\,000 \text{ \AA}$ проявляют электрические свойства, приемлемые для СВЧ применений ($n = 1.76$; $\tan \delta = 0.02$ при $U_1 = 0 \text{ V}$ на частоте 1 GHz).

Таким образом, компромисс при выборе толщины пленок и приемлемых СВЧ-характеристик позволит уже сегодня использовать BSTO пленки на кварцевых подложках для разработки приборов СВЧ диапазона.

Список литературы

- [1] Ponds J.M., Kirchoefer S.W., Chang W. et al. // Integr. Ferroelectr. 1998. V. 22. P. 317–323.
- [2] Miranda F., Van Keuls F.W., Romanofsky R.R. et al. // Integr. Ferroelectr. 1998. V. 22. P. 269–277.
- [3] Jaemo Im, Auciello O., Baumann P.K. et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. P. 625–627.
- [4] Baniecki J.D., Laibowitz R.B., Shaw T.W. et al. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. P. 498–506.
- [5] Kozyrev A.B., Ivanov A.V., Samoilova T.B. et al. // Integr. Ferroelectr. 1999. V. 24. P. 297–307.
- [6] Разумов С.В., Тумаркин А.В. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 16. С. 17.
- [7] Razumov S.V., Tumarkin A.V., Buslov O.U. et al. // Integr. Ferroelectr. 2001. V. 39. P. 367–373.
- [8] Козырев А.Б., Иванов А.В., Солдатенков О.И. и др. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 24. С. 16.
- [9] Козырев А.Б., Гайдуков М.М., Гагарин А.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 6. С. 51–56.
- [10] Вендик О.Г., Зубко С.П., Никольский М.А. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 4. С. 1–7.
- [11] Гольман Е.К., Логинов В.Е., Прудан А.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 21. С. 84–88.