

06

Влияние температуры осаждения на структурные и электрофизические свойства тонких пленок титаната бария—стронция

© А.В. Тумаркин, А.К. Михайлов, А.Г. Алтынников

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ)

E-mail: thinfilm@eltech.ru

В окончательной редакции 6 марта 2008 г.

Произведено исследование свойств тонких сегнетоэлектрических пленок BSTO, полученных методом высокочастотного ионно-плазменного распыления при различных температурах осаждения в диапазоне 700–900°С. Показано, что при температурах 700–800°С пленки проявляют поликристаллическую структуру, в то время как начиная с 800°С наблюдается изменение структуры пленок таким образом, что появляется доминирующая фаза с ориентацией (111). Исследовано влияние температуры осаждения на размеры кристаллитов полученных пленок, а также сделаны выводы о влиянии особенностей структуры пленок на их электрофизические параметры.

PACS: 81.15.kk, 77.84.Dy, 68.55.aj

В последнее время неуклонно возрастает интерес к сегнетоэлектрикам как к материалу для создания электронных приборов сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона. Этот интерес обусловлен сильной зависимостью диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрических материалов от приложенного электрического поля и относительно низким уровнем диэлектрических потерь в СВЧ-диапазоне, что позволяет создавать на их основе перспективные электрически управляемые приборы, такие как варакторы, фазовращатели, перестраиваемые фильтры, фазированные антенные решетки [1–3].

Использование сегнетоэлектрических материалов наряду с полупроводниками и ферритами позволяет расширить круг поиска оптимальных решений при разработке СВЧ-устройств. В частности, сегнетоэлектрические элементы могут иметь преимущества по сравнению с существующими

ющими по следующим параметрам: высокое быстродействие ($\leq 10^{-9}$ s), высокие рабочие мощности, высокая радиационная стойкость, низкий уровень СВЧ-потерь и соответственно высокий фактор качества по сравнению с полупроводниками и ферритами в частотном диапазоне свыше 1 GHz [4].

Кислородосодержащий сегнетоэлектрик титанат бария–стронция $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BSTO) хорошо зарекомендовал себя как основа для тонкопленочных приборов СВЧ-диапазона за счет сильной диэлектрической нелинейности и сравнительно малых потерь на частотах вплоть до 60 GHz [1,2]. Получение пленок BSTO методом высокочастотного ионноплазменного распыления на сегодняшний день является хорошо отработанным процессом, позволяющим выращивать пленки с одновременно высокой диэлектрической нелинейностью ($C(0)/C(E_{max}) = 2$) и малыми потерями ($\tan \delta = 0.016$ на 1 GHz) [4]. Здесь $C(0)$ и $C(E_{max})$ — емкости при нулевой и максимальной напряженности поля соответственно.

Знание взаимосвязей структурных и электрофизических характеристик получаемых пленок принципиально важно для широкого использования сегнетоэлектриков на СВЧ. Понимание этих связей позволит получать сегнетоэлектрические пленки с требуемыми электрофизическими параметрами (высокая нелинейность, низкие потери, температурная стабильность, быстродействие, отсутствие релаксации емкости), управляя структурными характеристиками пленок через параметры технологического процесса их роста.

Данная работа посвящена исследованию влияния температуры осаждения на структурные свойства сегнетоэлектрических пленок, а также на их электрофизические характеристики.

Исследуемые в работе 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 электрофизическими характеристиками, достаточными для СВЧ-применений [5]. Осаждение пленок проводилось на подложки поликристаллического оксида алюминия. Температура подложек контролировалась с помощью термопары, расположенной под подложкодержателем, температура которого изменялась в диапазоне от 700 до 900°С. В качестве рабочего газа использовался чистый кислород.

Перед процессом осаждения проводилось предраспыление мишени в стороне от подложкодержателя в течение 30 min. После осаждения образцы охлаждались в кислороде при атмосферном давлении со скоростью порядка 2–3°C/min. Толщина пленок, измеренная профилометром, составила 1 μm .

Для изучения структурных характеристик полученных пленок использовался метод рентгеновской дифрактометрии. Исследования проводились с помощью дифрактометра Rigaku-Dmax „Gagerflex“. Для исследования электрофизических характеристик на поверхности пленок методом фотолитографии были сформированы планарные конденсаторы с медными электродами. Линейные размеры конденсаторов были следующие: толщина электродов — 1 μm , зазор между электродами — 5 μm , длина зазора — 0.8 mm. Электрофизические характеристики: управляемость ($K = C(0)/C(E_{\text{max}})$) и уровень диэлектрических потерь ($\tan \delta$) — измерялись на частотах 1 и 30 GHz при комнатной температуре. Напряжение смещения, прикладываемое к конденсаторам U_{bias} менялось в диапазоне 0÷300 V, что соответствовало напряженности поля в зазоре $E = 0\div 60 \text{ V}/\mu\text{m}$.

Структурное качество сегнетоэлектрических пленок определяется присутствием кристаллитов различных ориентаций, их размерами, а также деформациями кристаллической решетки. Все эти факторы влияют на электрофизические свойства пленок. В частности, большое количество межзеренных границ отвечает за пониженную диэлектрическую проницаемость и высокие потери на СВЧ [6].

Исследования структуры полученных образцов методом рентгеновской дифрактометрии показали, что выращенные в данном температурном диапазоне пленки содержат блоки ориентаций (111), (110) и (200), причем количественное содержание той или иной фазы зависит от температуры осаждения. Из графика на рис. 1 хорошо видно, что начиная с температуры осаждения 800°C в пленках преобладает фаза с ориентацией (111). Согласно [7,8], при росте многокомпонентных пленок одной из причин изменения кристаллической структуры при увеличении температуры осаждения является изменение механизма массопереноса частиц на начальных стадиях формирования пленки. Так, при низких температурах подложки преобладающим механизмом роста пленок является послыйный рост, обусловленный поверхностной диффузией компонентов по подложке [7], что приводит к формированию поликристаллической пленки с малым разбросом кристаллитов по

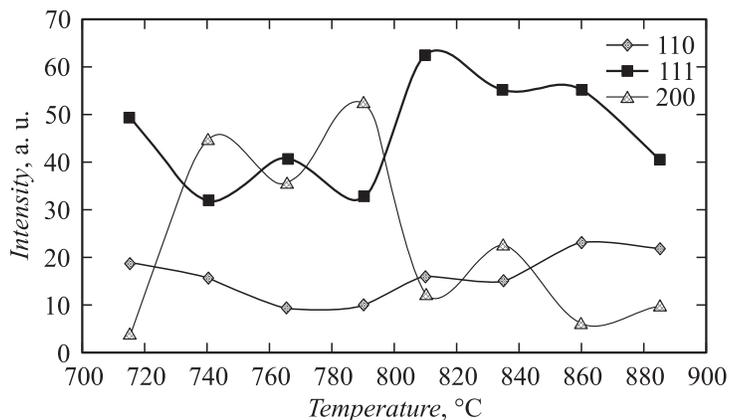


Рис. 1. Зависимость фазового состава от температуры осаждения пленок.

размерам. В нашем случае, согласно данным рентгеноструктурного анализа, при температуре порядка 800°C , по-видимому, происходит изменение механизма роста с послойного на пирамидально-островковый, что объясняется сменой механизма массопереноса частиц с поверхностной диффузии на диффузию через газовую фазу. Это изменение сопровождается сменой ориентации кристаллической решетки и увеличением размеров кристаллитов, что делает пленку более упорядоченной и менее дефектной, и позволяет рассчитывать на лучшие электрофизические характеристики.

Уменьшение дефектности пленок при увеличении температуры осаждения подтверждается анализом механических напряжений в исследуемых пленках. Межплоскостные расстояния для всех присутствующих в пленке фаз уменьшаются с увеличением температуры роста пленок, приближаясь к значениям, соответствующим порошковым образцам. В температурном диапазоне $700\text{--}800^{\circ}\text{C}$ расхождение параметров решетки с порошковым образцом составляло $+1.5\%$ и уменьшалось до $+0.5\%$ в диапазоне $800\text{--}900^{\circ}\text{C}$.

На рис. 2 представлена зависимость среднего размера кристаллитов различных фаз от температуры осаждения пленок. Интересен тот факт, что на зависимости присутствует выраженный максимум размера кристаллитов фазы (111) при температуре 810°C при преобладании

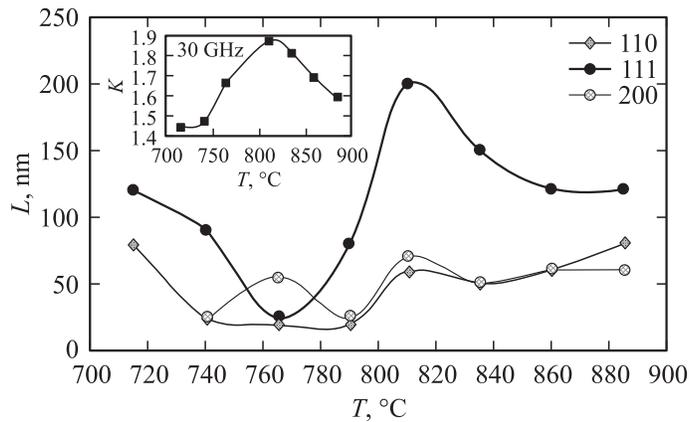


Рис. 2. Зависимость среднего размера кристаллитов L и управляемости K от температуры осаждения пленок.

данной фазы над остальными (рис. 1). На вставке на рис. 2 представлена зависимость управляемости планарных конденсаторов на основе пленок BSTO от температуры осаждения пленок с максимумом управляемости при температуре 810°C. Таким образом, технологические условия, обеспечивающие максимальные размеры кристаллитов преобладающей в пленке фазы (и минимальную площадь межзеренных границ), обеспечивают и максимальную диэлектрическую проницаемость пленки, а следовательно, и управляемость конденсатора на ее основе.

Диэлектрические потери исследуемых образцов ($\tan \delta$) составляют 0.02 на частоте 1 GHz и 0.05 на частоте 30 GHz соответственно и не зависят от температуры осаждения пленки, что говорит о том, что механизмы потерь, связанные с межзеренными границами, не являются преобладающими в данном случае.

Проведенные исследования свойств пленок титаната бария–стронция определили влияние температуры осаждения пленок на такие структурные свойства пленок, как фазовый состав и размеры кристаллитов. Прослеживается взаимосвязь между размерами кристаллитов в пленках и управляемостью конденсаторов, изготовленных на основе этих пленок. Пленки с максимальным средним размером кристаллитов преобладающей в пленке фазы демонстрируют максимальную управ-

ляемость при подходящем для применения в СВЧ-устройствах уровне потерь вплоть до 30 GHz.

Список литературы

- [1] *Козырев А.Б., Иванов А.В., Солдатенков О.И., Разумов С.В., Тумаркин А.В., Айгунова С.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 24. С. 16–18.
- [2] *Козырев А.Б., Гайдук М.М., Гагарин А.Г., Тумаркин А.В., Разумов С.В.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 6. С. 51–56.
- [3] *Kozyrev A., Ivanov A., Soldatenkov O., Tumarkin A., Ivanova S., Kaydanova T., Perkins J.D., Alleman J., Ginley D.S., Sengupta L., Chiu L., Zhang X.* // *Integrated Ferroelectrics*. 2003. V. 55. P. 847–852.
- [4] *Razumov S., Tumarkin A., Buslov O., Gaidukov M., Gagarin A., Ivanov A., Kozurev A., Yong-Won Song, Chan-Sik Park* // *Integrated Ferroelectrics*. 2001. V. 39. P. 367–373.
- [5] *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.
- [6] *Vendik O.G., Razumov S.V., Tumarkin A.V., Nikol'skii M.A., Gaidukov M.M., Gagarin A.G.* // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 86. P. 022 902.
- [7] *Дисперсионные системы на поверхности твердых тел. Механизмы образования тонких пленок (эволюционный подход)* / С.А. Кукушкин, В.В. Слезов. СПб.: Наука, 1996. 304 с.
- [8] *Куличин С.А., Yamaki T., Miyazoe H., Yamamoto H., Terashima K.* // *Физика твердого тела*. 2006. Т. 48. В. 5. С. 658.