

**А.В. Тумаркин С.В. Разумов, М.М. Гайдуков,
А.Г. Гагарин, А.А. Одинец**
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»

Структурированные сегнетоэлектрики. Новые возможности для СВЧ применений

В работе исследованы структурные свойства пленок титаната бария-стронция. Установлено, что технологические условия (в частности, температура осаждения) оказывают прямое влияние на компонентный состав пленок (соотношение бария и стронция), полученных из мишени фиксированного состава, что, в свою очередь, влияет на управляемость и потери структур на их основе. Предложены методы управления структурой растущих пленок за счет варьирования технологических параметров в процессе осаждения слоев. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-02-12096 офи_м и Минобрнауки РФ.

Ключевые слова: сегнетоэлектрические пленки, титанат бария-стронция

Сегодня одной из самых динамично развивающихся областей современной техники является электроника сверхвысоких частот (СВЧ). Одним из путей существенного улучшения характеристик современных СВЧ устройств является использование сегнетоэлектрических (СЭ) материалов, обладающих аномально высокой нелинейностью диэлектрических свойств и превосходящих по ряду электрофизических характеристик полупроводниковые и ферритовые материалы и микроэлектромеханические системы, традиционно используемые на СВЧ [1].

Среди исследуемых сегодня сегнетоэлектриков наиболее привлекательны для использования на СВЧ оксидные материалы типа перовскита. Важная особенность таких сегнетоэлектриков – это способность образовывать многокомпонентные твердые растворы, что позволяет создавать материалы, электрофизические свойства которых изменяются в широких пределах.

Характеристики электронных устройств, принцип действия которых основан на использовании сегнетоэлектрических пленочных материалов, в значительной мере зависят от состава и свойств СЭ пленки. Так, соотношение бария и стронция в пленке титаната бария-стронция (BST) определяет температуру фазового перехода из сегнетоэлектрического в параэлектрическое состояние, а, следовательно, уровень диэлектрической нелинейности и СВЧ потерь материала.

Традиционные технологические подходы к осаждению оксидных сегнетоэлектрических многокомпонентных покрытий, описанные в современной литературе [2], предполагают воспроизведение стехиометрии, заданной источником материала, на подложке и получение однородных по компонентному составу и параметрам решетки пленок. К сожалению, до сегодняшнего дня использование этих подходов не привело к получению материала, проявляющего все перспективные для СВЧ применений свойства сегнетоэлектриков одновременно. Как правило, за улучшение одного параметра приходится платить ухудшением другого, что является препятствием к широкому использованию материала на СВЧ.

В данной работе предлагается новый подход, в котором изменение технологических условий в процессе осаждения многокомпонентной пленки позволяет управлять ее структурой и, таким образом, получать покрытия с переменными по толщине свойствами (параметрами решетки, компонентным и фазовым составом, морфологией поверхности). Это дает возможность управлять такими электрофизическими характеристиками сегнетоэлектрических структур, как нелинейность, СВЧ потери, быстродействие, температурная зависимость свойств, что, в свою очередь, позволит получить материал с качественно новыми параметрами, оптимальными для СВЧ применений [3].

Исследуемые в работе пленки BST были получены методом ВЧ магнетронного распыления стехиометрической мишени $Ba_{0,4}Sr_{0,6}TiO_3$ диаметром 76 мм. Осаждение проводилось на подложки чистого сапфира (г-срез) и сапфира с платиновым подслоем, при температурах (T_s) от 600°C до 880°C. В качестве рабочего газа использовался кислород. Давление рабочего газа – 2 Pa. Толщина пленок составляла ~300 nm.

Кристаллическая структура и фазовый состав полученных пленок исследовались методом рентгеновской дифракции (излучение $CuK\alpha$).

Для электрофизических исследований на основе пленок BST были сформированы конденсаторные плоскопараллельные структуры «металл-BST-металл» (МДМ). Нижний электрод МДМ структур толщиной ~100 нм формировался посредством осаждения Pt слоя магнетронным распылением с последующей литографией и ионным травлением. После осаждения СЭ плёнки проводилась её литография путём химического травления в смеси кислот HF-HNO₃. Верхние электроды МДМ структур были изготовлены термическим осаждением 1 мкм плёнки Cu с адгезионным подслоем Cr, литографией и химическим травлением. Измерения СВЧ характеристик (ёмкость C и добротность) конденсаторов были проведены резонансным методом на частоте 2 ГГц. Управляемость конденсаторов рассчитывалась как отношение емкостей при нулевом и максимальном приложенном напряжении управления ($n=C(0V)/C(U_{max})$).

Метод структурирования СЭ пленки в составе многослойной структуры, обеспечивающий качественное изменение свойств многокомпонентного сегнетоэлектрического материала (управление компонентным и фазовым составом твердого раствора и параметрами кристаллической решетки), заключается в целенаправленном изменении температуры подложки в процессе осаждения. Температура осаждения, один из основных технологических факторов, влияет на механизмы зарождения и роста пленки на подложке, которые, в свою очередь, определяют такие важные структурные характеристики как параметры решетки, фазовый состав, размеры кристаллитов, морфологию поверхности пленки.

Суть предложенного метода состоит в выборе высокой (выше 800°C) температуры осаждения начального слоя и дальнейшим снижением температуры до рабочей (обеспечивающей требуемый компонентный состав) [3]. Высокая температура осаждения, за счет уменьшения содержания бария, уменьшает параметр ячейки СЭ слоя, формируемого на подложке, согласовывая его как с сапфиром, так и с платиной (минимизируя мертвый слой на нижнем интерфейсе), что обеспечивает преимущественно ориентированный рост пленки и улучшает электрические свойства. Использование данного метода позволяет получить

преимущественно ориентированную пленку без включения вторичных фаз и с минимальным количеством дефектов за счет согласования кристаллических решеток СЭ пленки и подложки как на чистом сапфире, так и на сапфире с платиновым нижним электродом.

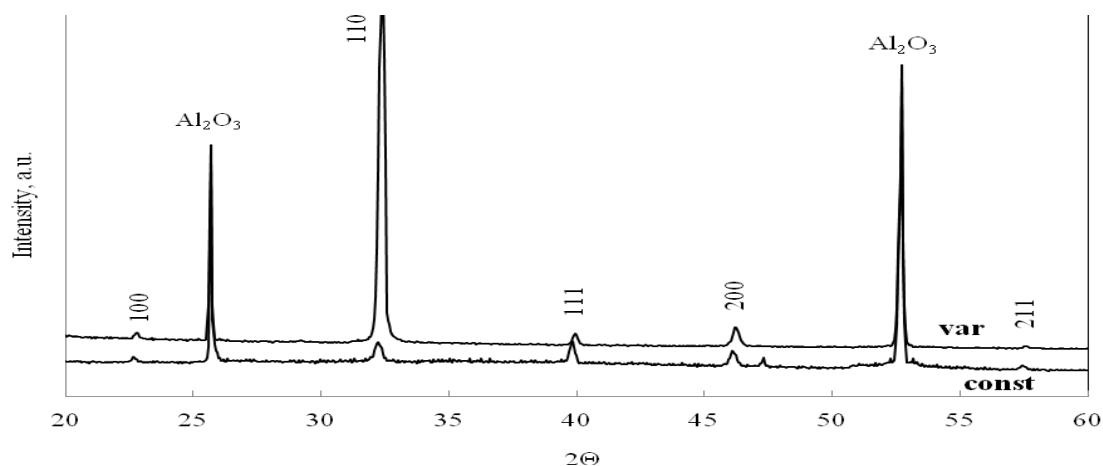


Рисунок 1

На Рисунке 1 приведены сравнительные дифрактограммы тонких сегнетоэлектрических пленок Ba_{0.4}Sr_{0.6}TiO₃ на монокристаллическом сапфире (г-срез), осажденных при неизменных технологических параметрах (const) и в процессе вышеописанного варьирования температурного режима осаждения (var). На графике хорошо видна разница в структурном совершенстве стандартного и структурированного образцов (поликристаллическая и преимущественно ориентированная в направлении 110 структура, соответственно).

Отметим, что г-срез [1102] сапфира обладает гексагональной кристаллической структурой и выводит на поверхность пластины ромб со стороной ~ 0,512 нм, которую можно сопоставить с постоянной решетки ~ 0,367 нм, при повороте базовой плоскости на 45°. С другой стороны, параметр кубической ячейки для твердого раствора Ba_{0.4}Sr_{0.6}TiO₃ – 0,3946 нм. Увеличение температуры осаждения начального слоя выше 800°C позволяет снизить параметр решетки формируемого слоя до 0,392 нм за счет уменьшения содержания бария в BST фазе, что уменьшает толщину переходного слоя «сапфир-BST». При использовании платинового слоя на сапфире для нижнего электрода многослойной структуры (параметр кубической решетки Pt 0,392 нм, преимущественная ориентация 111), появляется возможность практически полного согласования решеток, обеспечивая преимущественный рост СЭ слоя в направлении 111.

На Рисунке 2 приведены сравнительные вольт-фарадные зависимости емкостных структур «сапфир-Pt-СЭ-Cu» на основе тонких слоев Ba_{0.4}Sr_{0.6}TiO₃, осажденных при неизменных технологических параметрах (const) и в процессе структурирования пленки (var). Значительный выигрыш в диэлектрической нелинейности обусловлен преимущественно ориентированной кристаллической решеткой структурированной пленки без включения вторичных фаз и с минимальным количеством дефектов. Добротность в данной конструкции конденсатора определяется проводимостью платины и составляет порядка 50 на частоте 2 ГГц.

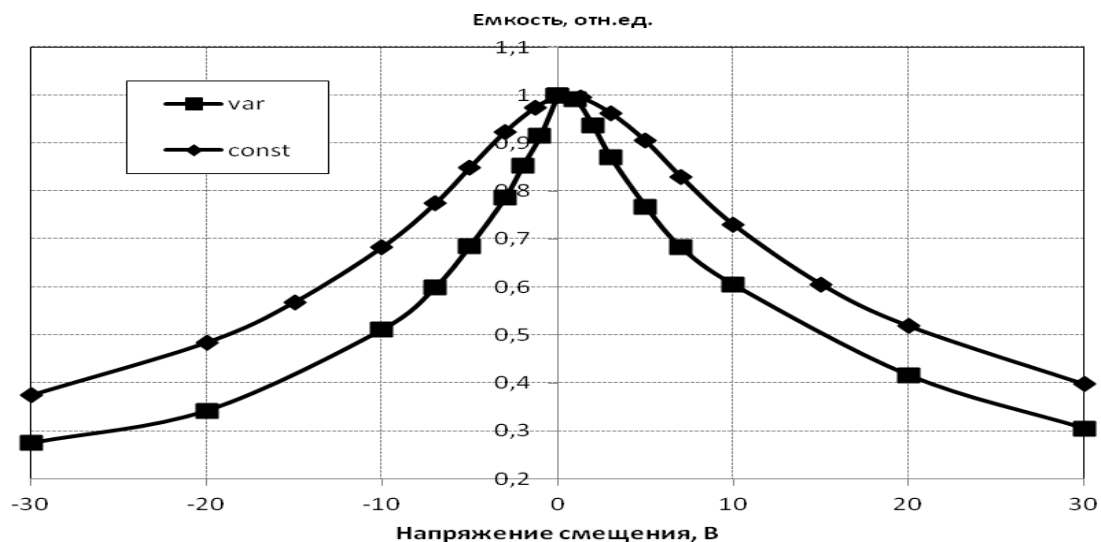


Рисунок 2

Другой возможностью управлять структурными свойствами многокомпонентных сегнетоэлектрических пленок является использование промежуточного отжига в процессе осаждения покрытия. Суть подхода состоит в последовательном нанесении СЭ слоев и их отжиге в среде кислорода, при выключенном ионно-плазменном разряде. Промежуточный отжиг слоя позволяет сформировать плотную, однородную кристаллическую структуру, свободную от дефектов как в анионной, так и в катионной подсистемах. Отсутствие потока распыленных атомов на подложку во время отжига позволяет диффундирующим адатомам встраиваться в решетку растущей пленки без образования вторичных зародышей на поверхности растущей пленки [4]. На Рисунке 3 приведены вольт-фарадные характеристики СЭ МДМ структур, полученных в режиме с промежуточным отжигом (var) в сравнении с лучшим результатом для СЭ пленки, полученной в стандартном технологическом режиме (const). Управляемость n порядка 5 достигнута впервые.

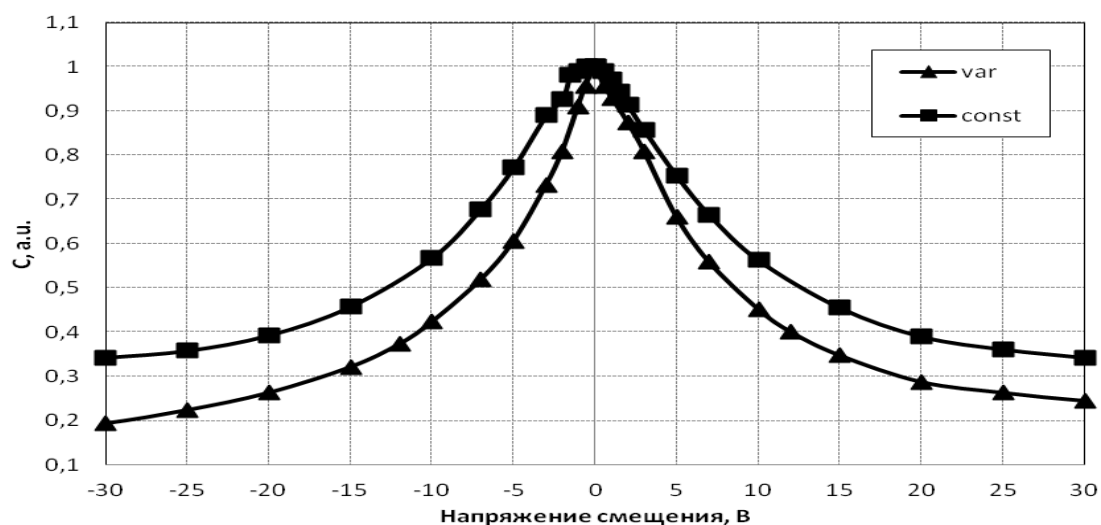


Рисунок 3

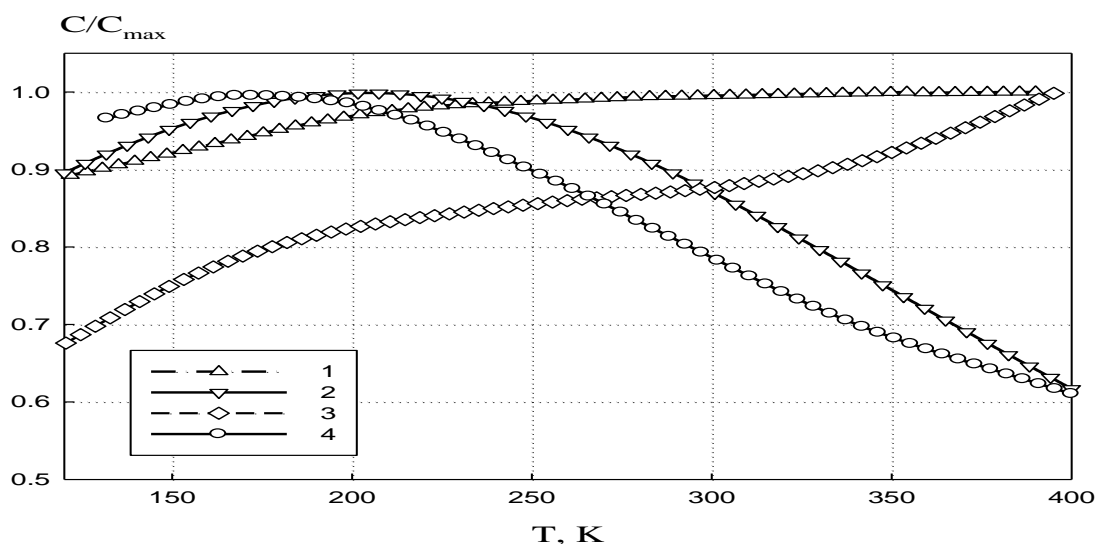


Рисунок 4

Использование вышеописанных подходов позволило реализовать двухслойную СЭ МДМ структуру, проявляющую высокую диэлектрическую нелинейность ($n=2$) и, одновременно, температурный коэффициент ёмкости (ТКС) – $(1\div 3) 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, что сопоставимо с величиной ТКС полупроводниковых варакторов. На рисунке 4 приведены сравнительные температурные зависимости ёмкости МДМ конденсаторов (1 – двухслойный, 2 – однослойный $x = 0.5$, 3 – однослойный $x = 0.9$, 4 – однослойный $x=0,3$). Ранее подобные данные по температурной стабильности свойств сегнетоэлектрических варикондов не публиковались. Решение проблемы температурной зависимости свойств сегнетоэлектриков позволяет рассчитывать на создание новых перспективных СВЧ устройств.

Подводя итоги проведенных исследований, можно говорить о возможности управления структурными и электрофизическими свойствами сегнетоэлектрических тонких пленок с помощью варьирования технологических параметров в процессе осаждения покрытий. Это позволяет согласовывать кристаллические решетки слоев и, тем самым, минимизировать количество дефектов на интерфейсах, что улучшает электрофизические характеристики СЭ устройств.

Библиографический список

1. Вендик О.Г. Сегнетоэлектрики находят свою «нишу» среди управляющих устройств СВЧ / О.Г. Вендик // – ФТТ. – 2009. – Т. 51. – Вып. 7. – С. 1441.
2. Рабе К.М. Физика сегнетоэлектриков. Современный взгляд. / К.М. Рабе, Ч.Г. Ана, Ж.М. Трискона // – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний. – 2011. – С. 240.
3. Тумаркин А.В. Структурные свойства пленочного титаната бария-стронция в зависимости от технологических условий роста пленок / А.В. Тумаркин, В.И. Альмяшев, С.В. Разумов, М.М. Гайдуков, А.Г. Гагарин, А.Г. Алтынников, А.Б. Козырев // – ФТТ – 2015. –Т. 57. – Вып. 3. – С. 540.
4. Кукушкин С.А. Дисперсные системы на поверхности твердых тел. Механизмы образования тонких пленок (эволюционный подход). / С.А. Кукушкин, В.В. Слезов // – СПб: Наука.– 1996. – С. 104.