

Новые сегнетоэлектрические твердые растворы для СВЧ применений

А.В. Тумаркин, Е.Н. Сапего, А.Г. Гагарин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: Проведено экспериментальное исследование структурных и электрофизических свойств многокомпонентных пленок твердых растворов титаната-цирконата бария и титаната-станната бария на подложках сапфира. Показано, что при использовании отжига на подложке формируются пленки с компонентным составом, близким составу распыляемых мишеней. Определены оптимальные температуры осаждения тонких пленок для получения наилучших электрофизических параметров.

Ключевые слова: сегнетоэлектрические тонкие пленки, цирконат-титанат бария, станнат-титанат бария, высокочастотное магнетронное распыление, рентгеновская дифрактометрия

1. Введение

Электроника сверхвысоких частот (СВЧ) является одной из самых динамично развивающихся областей современной техники. Приборы и устройства, работающие в СВЧ диапазоне, применяются в системах телекоммуникаций, радиолокации и передачи данных. Развитие СВЧ электронной компонентной базы (ЭКБ) является обязательным условием для улучшения технических характеристик СВЧ систем и увеличения скорости обработки информации.

Сегнетоэлектрики (СЭ) представляют большой интерес для СВЧ электроники в силу высокой диэлектрической нелинейности и малых потерь на частотах свыше 1 ГГц. На основе СЭ материалов разработаны и реализованы лабораторные макеты фазовращателей, управляемых фильтров, линий задержки и фазированных антенных решеток. Среди исследуемых сегодня сегнетоэлектриков наиболее привлекательны для использования на СВЧ оксидные материалы типа перовскита. Характерная особенность структуры кристаллов этой группы – наличие кислородного октаэдра, внутри которого располагается ион Ti или другой ион с малым ионным радиусом. Такие сегнетоэлектрики могут образовывать многокомпонентные твердые растворы, что позволяет создавать материалы, электрофизические свойства которых изменяются в широких пределах. На основе титаната бария ($BaTiO_3$) исследовано большое количество твердых растворов с замещением атомов Ba или Ti другими элементами. Но если СВЧ свойства твердых растворов титаната бария-стронция $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BST) исследованы достаточно подробно, то информация о характеристиках твердых растворов титанатов - цирконатов и титанатов - станнатов бария $BaTi_xZr_{1-x}O_3$ (BZT) и $BaTi_xSn_{1-x}O_3$ (BSnT) в современной литературе представлена лишь несколькими работами [1-5], с отрывочным описанием их низкочастотных свойств в диапазоне 100 кГц – 1 МГц, что не позволяет судить о потенциале данных твердых растворов для СВЧ применений.

Целью данной работы является исследование структурных и СВЧ свойств BZT и BSnT пленок на диэлектрических подложках. Данные сегнетоэлектрические материалы перспективны с точки зрения потерь и нелинейности, а формирование планарных структур на основе этих материалов на диэлектрической подложке позволяет обеспечить существенно больший уровень рабочей мощности СВЧ устройства.

2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Формирование пленок проводилось методом высокочастотного магнетронного распыления керамических мишеней $\text{BaTi}_{0,5}\text{Sn}_{0,5}\text{O}_3$ и $\text{BaTi}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_3$ на подложках поликристаллического Al_2O_3 . Температура подложки варьировалась от 650°C до 850°C . В качестве рабочего газа использовалась смесь аргона и кислорода в соотношении $\text{Ar}/\text{O}_2 = 80/20$. Давление рабочего газа в процессе осаждения составляло 2 Па. После осаждения пленки охлаждались в атмосфере рабочего газа со скоростью $2\text{--}3^\circ\text{C}/\text{мин}$. Толщина пленок составляла 500 нм. Полученные образцы подверглись высокотемпературному отжигу на воздухе при 1100°C в течении 2 часов.

Кристаллическая структура и фазовый состав полученных пленок исследовались методом рентгеновской дифракции с помощью дифрактометра ДРОН-6 на эмиссионной спектральной линии $\text{CuK}_{\alpha 1}$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). Для электрофизических исследований на основе пленок BSnT и BZT были сформированы планарные конденсаторы, ширина зазора в которых составляла 5 мкм. Верхние электроды конденсаторов были изготовлены посредством термического осаждения пленки Cu толщиной 1 мкм с адгезионным подслоем хрома с последующей литографией и химическим травлением.

Измерения емкости C и добротности $Q = 1/\tan\delta$ конденсаторов были проведены на частоте 1 и 3 ГГц с помощью резонатора и векторного анализатора НР 8719С. Резонатор обеспечивает ненагруженную добротность 1000, погрешность измерения емкости и добротности 1 и 5% соответственно, возможность подачи управляющего напряжения U до 1000 В, что соответствует напряженности управляющего поля $200 \text{ В}/\text{мкм}$. Управляемость конденсаторов рассчитывалась как отношение емкостей при нулевом и максимальном приложенном напряжении управления: $n = C(0\text{В})/C(U_{\text{макс}})$. Характеризация образцов на частоте 60 ГГц проводилась по методике открытого резонатора (Фабри–Перо).

На рисунке 1 и 2 представлены дифрактограммы пленок BSnT и BZT , осажденных при температуре подложки 800°C , до и после высокотемпературного постростового отжига на воздухе. Пунктирные линии соответствуют угловым положениям рефлексов для состава распыляемых мишеней.

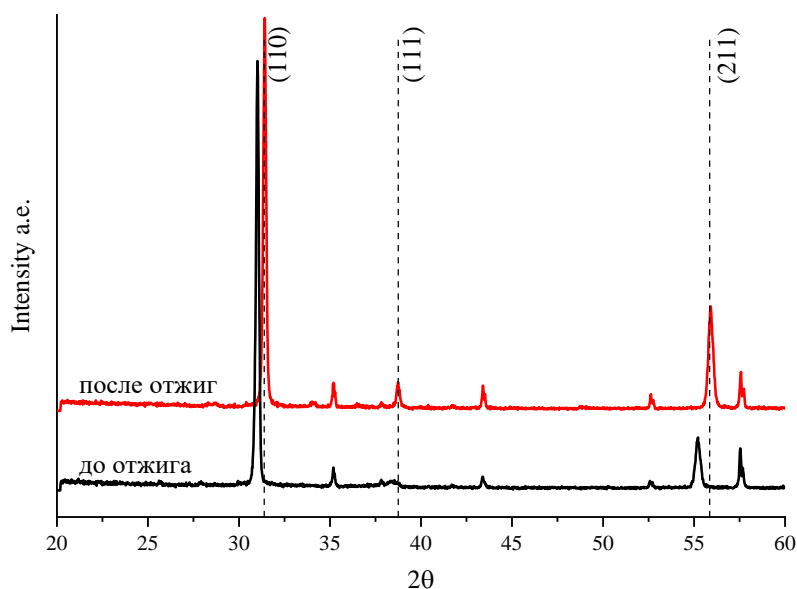


Рисунок 1. Результат отжига для твердого раствора титаната-станната бария при составе рабочего газа $\text{Ar}/\text{O}_2 = 80/20$

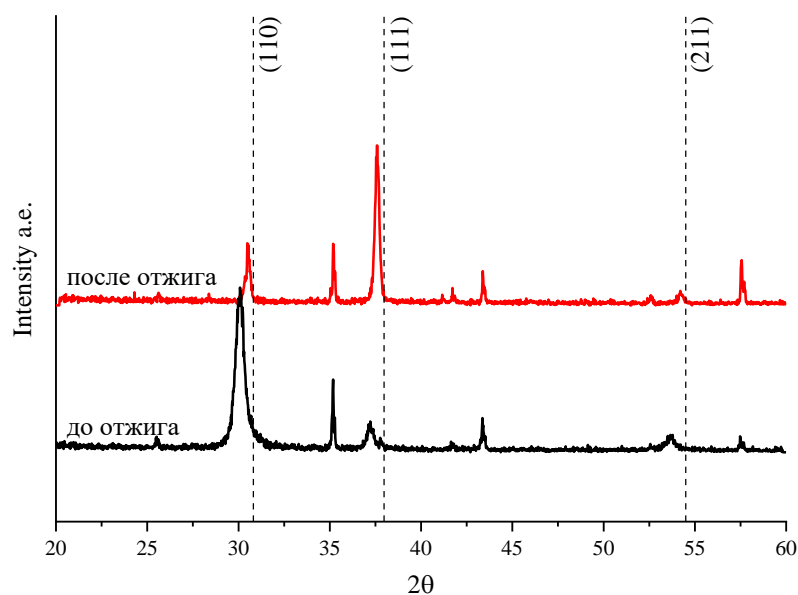


Рисунок 2. Результат отжига для твердого раствора титаната-цирконата бария при составе рабочего газа $Ar/O_2 = 80/20$

На графиках, представленных на рис. 1 и 2, хорошо видно смещение рентгеновских рефлексов в сторону больших углов для образцов, подвергнутых отжигу, что свидетельствует об изменении состава твердого раствора и его приближении к составу распыляемой мишени в результате высокотемпературной обработки. Данная тенденция проявляется для всех пленок, осажденных в исследуемом температурном диапазоне с последующим отжигом, и более выражена для титаната-станната бария.

Для изучаемых твердых растворов было проведено исследование зависимости электрофизических свойств пленок от температуры их осаждения на частоте 3 ГГц, после того, как пленки были подвергнуты отжигу. На рисунках 3 и 4 представлены зависимости нормированной на максимальное значение емкости и добротности планарных конденсаторов на основе BSnT и BZT пленок соответственно.

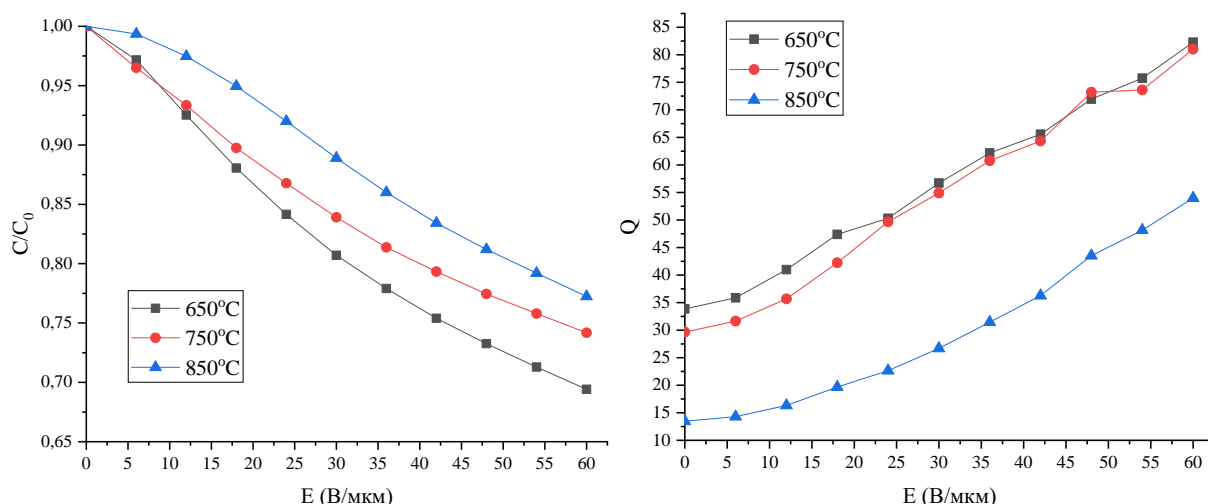


Рисунок 3. Нормированная емкость и добротность конденсаторов на основе пленок титаната-станната бария в зависимости от температур осаждения

Из рисунков следует, что электрические свойства исследуемых твердых растворов по-разному зависят от температуры осаждения пленок. Так конденсаторы на основе титаната-станната бария, осажденных при 650 °С, демонстрирует наибольшую управляемость и наименьшие потери по сравнению с пленками, осажденными при более высоких

температурах подложки (рисунок 3). Для титаната-цирконата бария, напротив, улучшение электрофизических свойств наблюдается при повышении температуры подложки (рисунки 4). Данные тенденции, очевидно, зависят от различного влияния высокотемпературной обработки на структуру пленок BSnT и BZT (см. рис. 1 и 2).

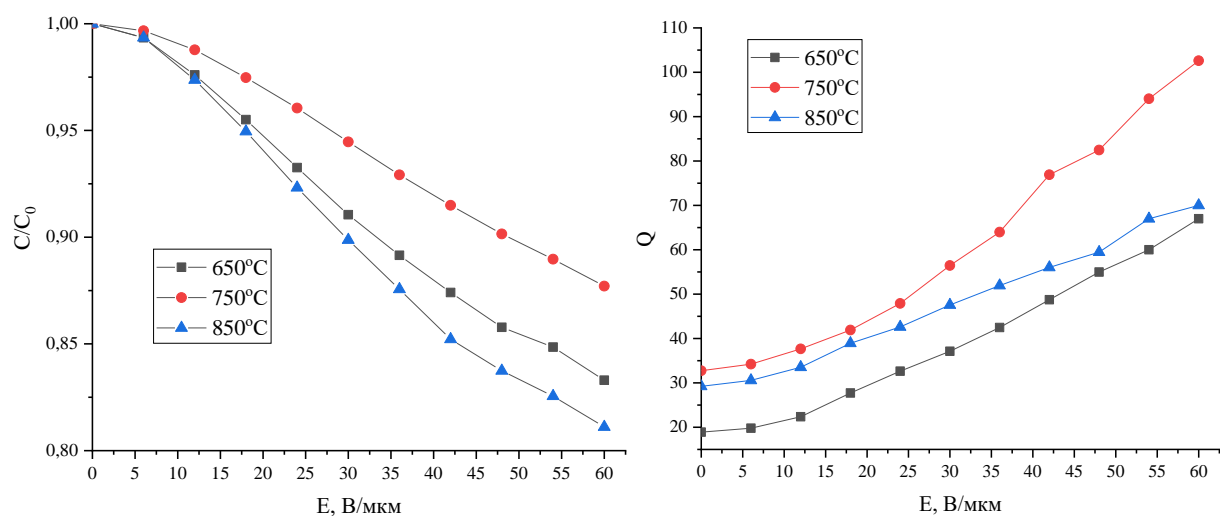


Рисунок 4. Нормированная емкость и добротность конденсаторов на основе пленок титаната-цирконата бария в зависимости от температур осаждения

Исследования электрических свойств конденсаторов на основе пленок BSnT и BZT, осажденных при температуре 800 °С и отожженных на воздухе, были проведены в частотном диапазоне от 1 до 60 ГГц (см. рисунки 5 и 6). Данные измерений подтверждают отсутствие частотной дисперсии диэлектрической проницаемости исследуемых твердых растворов, а также приемлемый для применений уровень потерь. Полученные результаты говорят о перспективности использования тонких сегнетоэлектрических пленок твердых растворов BaSn_{0,5}Ti_{0,5}O₃ и BaZr_{0,5}Ti_{0,5}O₃ в устройствах СВЧ диапазона.

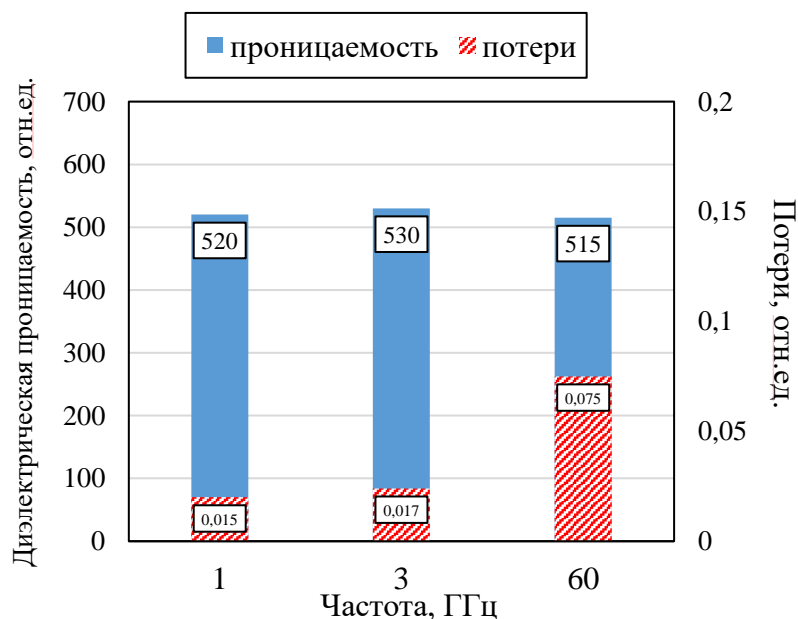


Рисунок 5. Диэлектрическая проницаемость и потери BSnT пленок на подложках поликора, измеренные в частотном диапазоне 1-60 ГГц.

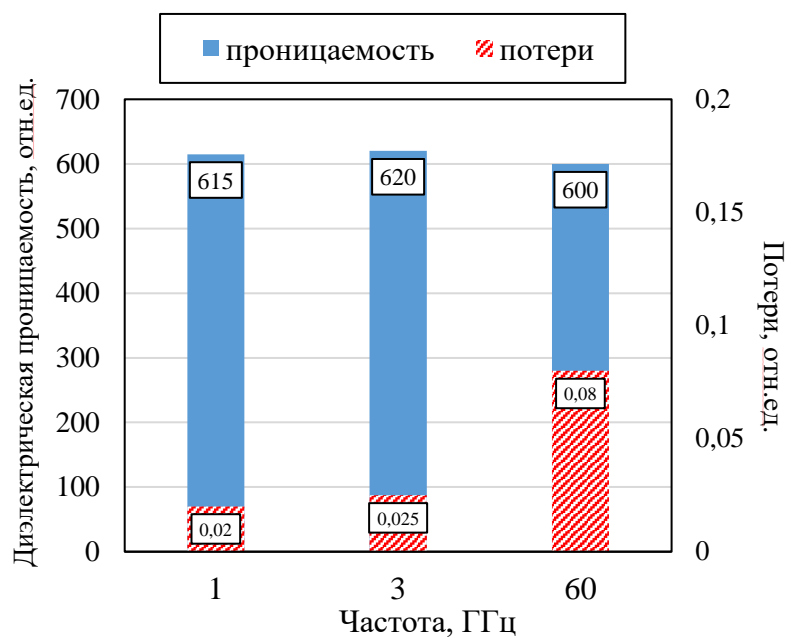


Рисунок 6. Диэлектрическая проницаемость и потери BZT пленок на подложках поликора, измеренные в частотном диапазоне 1-60 ГГц.

3. Заключение

В работе исследованы структурные свойства сегнетоэлектрических пленок титаната-станната и титаната-цирконата бария на подложках поликора и сверхвысокочастотные характеристики планарных емкостных элементов на их основе. Установлено, что высокотемпературный отжиг после осаждения пленки оказывает существенное влияние на кристаллическую структуру, фазовый состав пленок и их электрические характеристики. Впервые продемонстрирован низкий уровень диэлектрических потерь планарных емкостных элементов на основе пленок титаната-станната и титаната-цирконата бария в частотном диапазоне 1 – 60 ГГц при приемлемой управляемости.

Работа выполнена при финансовой поддержке **Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 19-31-27001.**

Список литературы

1. Maiti T., Guo R., Bhalla A. S. Evaluation of experimental resume of BaZrxTi1-xO3 with perspective to ferroelectric relaxor family: an overview //Ferroelectrics. – 2011. – Т. 425. – №. 1. – С. 4-26.
2. Xu J., Menesklo W., Ivers-Tiffée E. Investigation of BZT thin films for tunable microwave applications //Journal of the European Ceramic Society. – 2005. – Т. 25. – №. 12. – С. 2289-2293.
3. Zhu G. S. et al. Study on the influence of powder size on the properties of BTS/ITO thin film by RF sputtering from powder target //Materials Letters. – 2017. – Т. 194. – С. 90-93.
4. Wang B. et al. Effects of oxygen to argon ratio on Ba(Zr_{0.2}Ti_{0.8})O₃ thin films prepared by RF magnetron sputtering //Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2009. – Т. 20. – №. 7. – С. 614-618.
5. Wu M. et al. Thickness dependence of microstructure, dielectric and leakage properties of BaSn_{0.15}Ti_{0.85}O₃ thin films //Ceramics International. – 2018. – Т. 44. – №. 10. – С. 11466-11471.