

5. Расчет из (6)-(7) изменений распределений напряжения $d\sigma(z)$, отвечающих текущим изменениям $d\varepsilon(z)$ и dT .

6. Расчет распределений по глубине переменных модифицированных состояний, включающих внутренние переменные моделей материалов.

Отметим, что аналогичный подход можно использовать в построении уравнений, для анализа поведения трехслойных или многослойных тонких композиционных пластин.

Список литературы

1. Пряхин С.С., Рубаник В.В. мл. О задаче изгиба биметаллической пластины с элементом из сплава с памятью формы / Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии» Сборник статей, 24-26 мая 2011 г., Витебск.- С. 92-95.

2. Пряхин С.С., Рубаник В.В. мл. Моделирование термомеханического поведения сплавов с памятью формы. В монографии: Современные перспективные материалы. Витебск: Изд-во УО "ВГТУ". – 2011.- С. 415-449.

3. Москвитин В.В. Пластичность при переменных нагрузениях. М.: Изд. МГУ. – 1965. – 266с.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В МНОГОСЛОЙНОЙ КЕРАМИКЕ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$

¹Шут В.Н., ¹Сырцов С.Р., ¹Трубловский В.Л., ²Пинчук Т.И.

¹ ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», г. Витебск, Республика Беларусь, shut@vitebsk.by

² ГНУ «Институт порошковой металлургии НАН Беларуси», г. Минск, Республика Беларусь

Введение

Высокие диэлектрические характеристики сегнетоэлектрической керамики на основе твердых растворов титаната бария-стронция ($Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$, BST) и возможность изменения их с помощью внешних воздействий (электрических, тепловых, деформационных) обуславливает ее широкое применение в современной электронике (конденсаторостроение, техника СВЧ и т.д.) [1–3]. При практическом использовании керамических пленок BST (особенно в высокочастотной электронике) к их параметрам предъявляются жесткие требования – они должны иметь низкие диэлектрические потери ($tg\delta$) в микроволновой области и минимальную дисперсность диэлектрических характеристик в широком температурном интервале (от -20 до $+80^\circ C$). Однако, как и для любой сегнетоэлектрической системы, для керамики BST характерна сильная температурная зависимость параметров в области температуры Кюри и повышенный уровень диэлектрических потерь в сегнетофазе [4, 5]. Несмотря на не снижающийся объем исследований однородных по составу сегнетоэлектрических керамических (в том числе BST) структур, возможности улучшения их характеристик «традиционными» способами практически исчерпаны.

Решение указанных проблем было найдено в рамках принципиально нового подхода в физике сегнетоэлектрических материалов, интенсивно развиваемого в последние годы – создание градиентных сегнетоэлектриков, т.е. структур с изменяющимися по объему характеристиками (составом). Экспериментально была подтверждена возможность улучшения диэлектрических свойств таких структур за счет формирования межфазных границ, обусловленных изменением состава (compositional interfaces). Кроме того, в некоторых градиентных тонких пленках было обнаружено необычное явление

уменьшения диэлектрических потерь, связанное, по-видимому, с резким уменьшением подвижности дефектов в пленках или в результате их захвата межфазными границами [6].

Для толстопленочных систем (толщиной более 100 мкм) наиболее перспективным способом создания градиента состава является формирование многослойных структур с использованием метода шликерного литья. Указанный метод был ранее адаптирован нами для получения многослойной керамики $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ с изменяющейся концентрацией стронция по толщине от $x=0$ до $x=0.25$. Была экспериментально подтверждена высокая температурная стабильность диэлектрических характеристик (ϵ и $tg\delta$) полученных образцов [7, 8]. В то же время, для исследования возможности практического применения градиентных структур в различных ВЧ-компонентах важно знание зависимости ϵ и диэлектрических потерь в них от частоты приложенного электрического поля.

Интерес к исследованию частотных характеристик указанных систем обусловлен и тем обстоятельством, что им присущ ряд особенностей диэлектрического поведения – сильное размытие фазового перехода, наличие областей с различным электрическим упорядочением (поляризацией) и других, свидетельствующих о возможности проявления в них релаксорных свойств. Отметим, что расширение класса релаксорных сегнетоэлектриков является одной из наиболее актуальных и важных задач в современном материаловедении.

Целью данной работы было изготовление многослойных керамических структур $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ ($x=0-0.25$) и исследование их диэлектрических характеристик (ϵ и $tg\delta$) при различных частотах приложенного поля.

Экспериментальная часть

Объектом исследования в данной работе являлась многослойная структура

$Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$, состоящая из слоев, содержание стронция в которых последовательно возрастало на 5 мол% от $x=0$ до $x=0.25$. Изготовление отдельных керамических слоев фиксированного состава (толщиной ~ 28 мкм) осуществлялось по толстопленочной технологии (методом шликерного литья). Более подробно технология изготовления как отдельных слоев, так и всей многослойной структуры в целом, изложена в работах [7, 8]. Окончательная толщина многослойных керамических образцов составляла ~ 300 мкм, площадь 0.5 см². Микроструктура спеченных образцов изучалась с помощью растрового электронного микроскопа высокого разрешения MIRA (TESCAN). Измерения диэлектрической проницаемости (ϵ) и тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) проводились на автоматизированной установке, созданной на базе измерителей импеданса E7-12, E7-14. Измеритель импеданса E7-12 позволяет проводить диэлектрические измерения на частоте электрического поля 1 МГц, а E7-14 – на частотах 0.1, 1 и 10 кГц. Для электрофизических измерений на поверхности образцов напылялись серебряные электроды.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена характерная микроструктура изготовленных образцов (поперечный разрез). Микроструктура отдельных слоев градиентной структуры подобна микроструктуре однородной керамики соответствующего состава [4, 5]; тенденция изменения ее сохраняется – с увеличением содержания стронция размер зерна уменьшается. Таким образом, используемые при изготовлении градиентной керамики высокотемпературные режимы обжига не приводят к существенной гомогенизации ее состава. Это подтверждается и прямыми исследованиями пространственного распределения Ba и Sr по толщине образца [8].

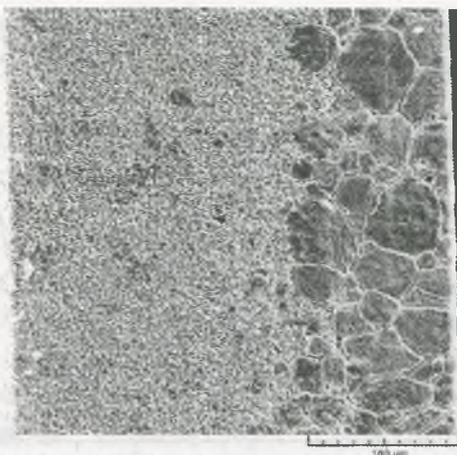


Рисунок 1 – Микроструктура неоднородной керамики $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ с градиентом состава $x=0-0.25$.

Зависимость диэлектрической проницаемости градиентной керамики от температуры при различных частотах приложенного электрического поля представлена на рис. 2. С ростом частоты наблюдается монотонное уменьшение ϵ . При температурах, превышающих наибольшее значение температуры Кюри в градиентной структуре ($T \approx 120^\circ C$), зависимости $\epsilon(T)$ для разных частот совпадают. При всех частотах наблюдается сильно размытая температурная зависимость $\epsilon(T)$, особенно это проявляется в диапазонах температур $0-30^\circ C$ и $70-120^\circ C$.

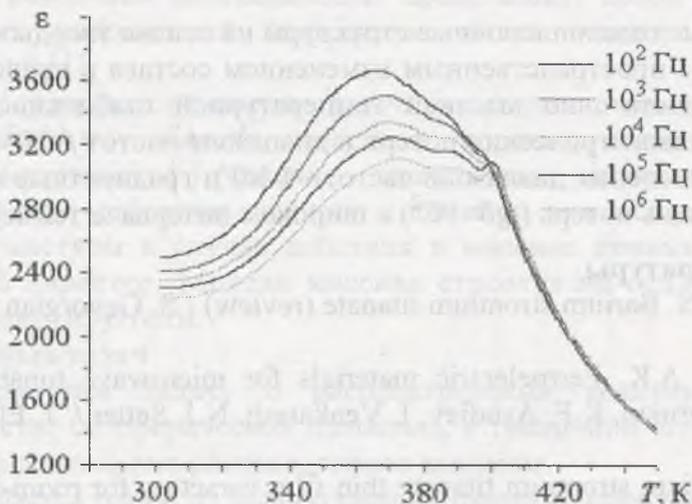


Рисунок 2 – Температурная зависимость диэлектрической проницаемости керамики $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ с градиентом состава ($x=0-0.25$) при различных частотах.

Как уже отмечалось, одним из важнейших факторов, определяющих эффективность практического использования материалов с сегнетоэлектрической неустойчивостью, является уровень и температурная стабильность диэлектрических потерь в них. В отличие от образцов однородного состава, имеющих значительные температурные аномалии в области фазового перехода [4, 5], в градиентных образцах на всех исследуемых частотах такие аномалии существенно сглажены (рис. 3).

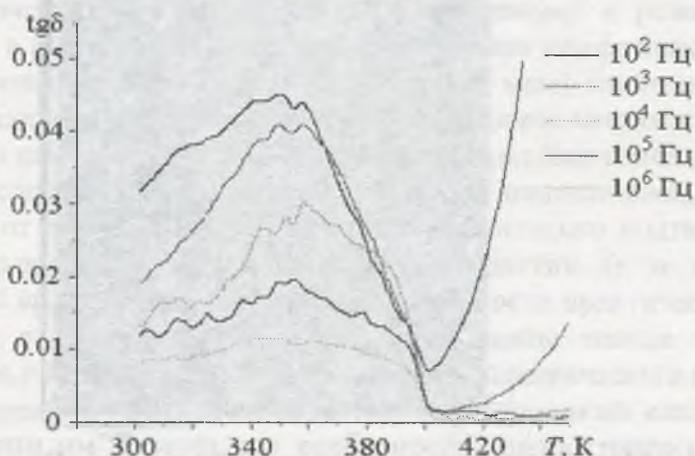


Рисунок 3 – Температурная зависимость диэлектрических потерь в многослойной керамике $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ с градиентом состава ($x=0-0.25$) при различных частотах.

С увеличением частоты диэлектрические потери уменьшаются, а их зависимость от температуры снижается. При температурах, превышающих наибольшее значение температуры Кюри T_c в градиентной структуре, когда все слои находятся в парафазе, уровень диэлектрических потерь резко снижается ($tg\delta \sim 10^{-3}$). Особенно следует отметить низкий уровень потерь ($tg\delta \sim 10^{-2}$) и высокую их термостабильность в широкой области температур (0–130°C) в практически важном диапазоне частот ($f \sim 10^6$ Гц).

Заключение

Многослойные толстопленочные структуры на основе твердых растворов

$Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ (с пространственным изменением состава в пределах от $x=0$ до $x=0.25$) характеризуются достаточно высокой температурной стабильностью диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь в диапазоне частот $f=10^2-10^6$ Гц. В важном для практического применения диапазоне частот ~ 1 МГц градиентные керамические образцы имеют низкий уровень потерь ($tg\delta \sim 10^{-2}$) в широком интервале температур (от 0 до 130°C).

Список литературы

1. Gevorgian, S. Barium strontium titanate (review) / S. Gevorgian – Gothenburg. Sweden, 2005. – 20 p.
2. Tagantsev, A.K. Ferroelectric materials for microwave tunable applications / A.K. Tagantsev, V.O. Sherman, K.F. Astafiev, I. Venkatesh, N.J. Setter // J. Electroceram. – 2003.- V. 11. – P. 5–66.
3. Bao, P. Barium strontium titanate thin film varactors for room-temperature microwave device application / P. Bao, T.J. Jackson, X. Wang, M.J. Lancaster // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2008. – V. 41. – P. 063001–063021.
4. Lemanov, V.V. Phase transition and glasslike behavior in $Sr_{1-x}Ba_xTiO_3$ / V.V. Lemanov, E.P. Smirnova, P.P. Syrnikov, E.A. Tarakanov // Phys. Rev. B. – 1996. – V. 54. – P. 3151–3157.
5. Hilton, A.D. Dielectric properties of $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ ceramics / A.D. Hilton, B.W. Ricketts // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1996. – V. 29. – P. 1321–1325.
6. Cole, M.W. Enhanced dielectric response and temperature insensitivity of compositionally stratified $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ thin films / M.W. Cole, S.P. Alpay // Integrated Ferroelectrics. – 2008. – V. 100. – P. 48–60.
7. Shut, V.N. Compositionally graded BST ceramics prepared by tape casting / V.N. Shut, S.R. Syrtsov, V.L. Trublovsky, A.D. Poleyko, S.V. Kostomarov, L.P. Mastyko // Ferroelectrics. – 2009. – V. 386. – P. 125–132.
8. Шут, В.Н. Градиентная керамика на основе твердых растворов $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ / В.Н. Шут, С.Р. Сырцов, В.Л. Трубловский, Б.А. Струков // Неорганические материалы. – 2011. – Т. 47, № 1. – С. 1–7.