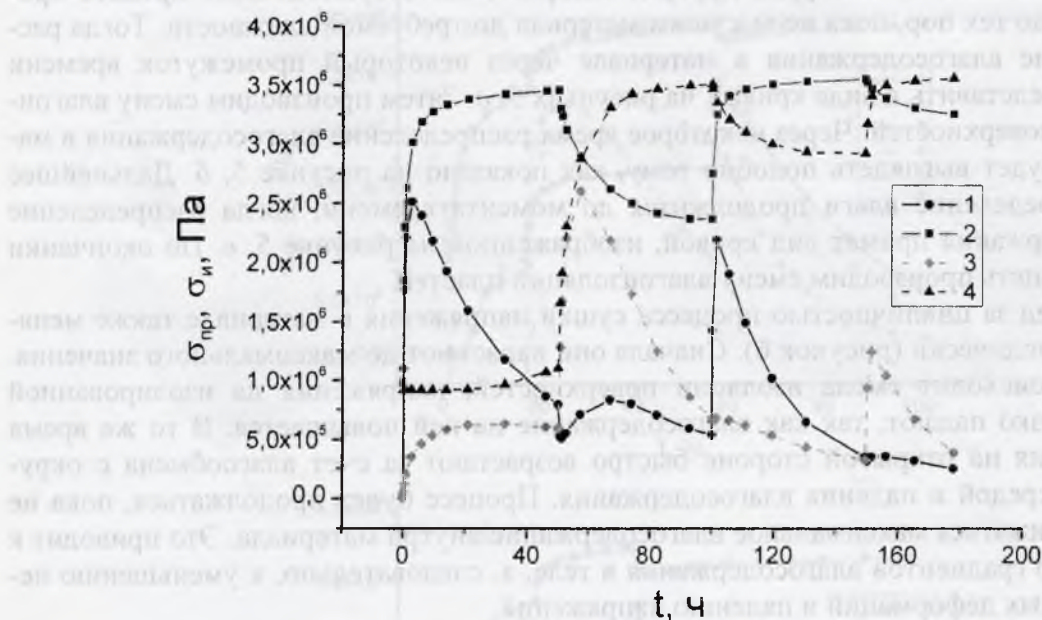




1 — $\sigma_{и}$ и 2 — $\sigma_{пр}$ в центре верхней поверхности; 3 — $\sigma_{и}$ и 4 — $\sigma_{пр}$ в центре нижней поверхности

Рис.6. Изменение во времени прочности $\sigma_{пр}$ и интенсивности нормальных напряжений $\sigma_{и}$ при периодической смене изоляции пластей

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАДИЕНТНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$

Шут В. Н., Сырцов С. Р., Трубловский В. Л.

Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси
г. Витебск, Республика Беларусь, shut@vitebsk.by

1. Введение

В последние годы достигнут существенный прогресс в получении градиентных (многослойных) сегнетоэлектрических структур различного состава с электрофизическими характеристиками, превосходящими параметры пространственно однородных материалов. Особенно большой объем исследований был выполнен по изучению структур на основе твердых растворов титаната бария-стронция $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ (BST) с пространственным изменением соотношения барий/стронций [1, 2].

Кроме несомненной практической перспективы, градиентные сегнетоэлектрики (graded ferroelectrics, GF) весьма интересны и с научной точки зрения, в плане исследования в них особенностей сегнетоэлектрической неустойчивости, процессов поляризации и т. п. В отличие от однородных сегнетоэлектриков, характеризующихся симметричной петлей гистерезиса относительно осей поляризации P (заряда Q) и приложенного поля E , в некоторых градиентных тонкопленочных структурах наблюдается существенное смещение петли вдоль оси поляризации [3].

Несмотря на значительный объем экспериментальных и теоретических исследований GF, отраженный в большом числе публикаций в авторитетных изданиях, четкого понимания природы поляризационных процессов в градиентных структурах

до сих пор не достигнуто. Большинство исследований по данной тематике посвящено изучению тонкопленочных материалов (толщиной менее 1 мкм). На их свойства значительное влияние оказывает подложка и в большинстве случаев можно говорить о сегнетоэлектрических характеристиках структуры "тонкая пленка – подложка". Остается во многом загадочным наличие в поляризационных экспериментах по тонким пленкам сдвига петли гистерезиса лишь вдоль оси поляризации P и его отсутствие по оси E . В то же время известно, что для монокристаллов с градиентом состава (примеси) характерно наличие сдвига петли по обеим осям [4]. Поэтому исследование процессов поляризации в толстых градиентных (многослойных) пленках, которые могут быть получены в свободном состоянии (без подложки), представляет самостоятельный интерес [5].

2. Результаты экспериментов и обсуждение

Объектом исследования являлись многослойные структуры $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$, состоящие из чередующихся слоев, содержание стронция в которых менялось на 5 мол% (от $x = 0$ до $x = 0.3$). Технология изготовления указанных материалов приведена в работах [6, 7].

Исследования распределения элементов показали, что высокотемпературная термообработка образцов в процессе спекания приводит к изменению ступенчатого закона пространственного распределения бария и стронция на квазинепрерывный. Микроструктура различных областей градиентной керамики подобна микроструктуре однородных материалов. В частности, наблюдалось характерное для системы BST уменьшение размера зерна с увеличением концентрации Sr. Это свидетельствует о том, что при выбранных условиях спекания значительного растворения соседних слоев не происходит. Рентгеноструктурные исследования как однородных, так и градиентных образцов свидетельствуют, что используемая в данной работе технология позволяет получать однофазные структуры во всем диапазоне концентрации Sr ($x=0-0.3$). Можно также предположить, что каждый из пространственных слоев градиентной структуры имеет параметры (в частности диэлектрическую проницаемость ϵ и спонтанную поляризацию P_s), близкие к параметрам однородных материалов соответствующего состава.

Нами были изучены поляризационные характеристики однородных пленок BST с составами, используемыми в дальнейшем при создании градиентных структур. Концентрационные зависимости основных параметров P_r и E_c , характеризующих гистерезисные явления, представлены на рис. 1.

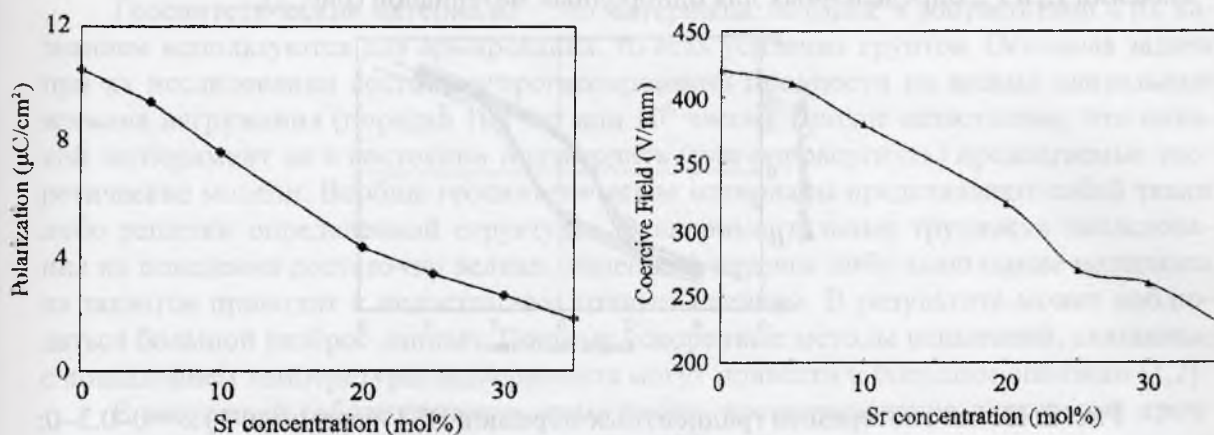


Рис. 1. Зависимость остаточной поляризации P_r (а) и коэрцитивного поля E_c (б) однородной керамики $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ от концентрации стронция

Пространственная зависимость электрофизических характеристик в градиентных структурах и связанное с этим неоднородное распределение приложенного поля усложняют процесс описания поляризационных процессов. Полагая, что свойства исследуемых материалов меняются лишь в одном направлении (перпендикулярно электродам), можно записать следующее соотношение для напряженности электрического поля $E_i(0,0,E_z)$ и переключаемой части поляризации P_i в различных частях многослойной структуры

$$\sum d_i E_i = U, \quad (1)$$

$$D_i = \varepsilon_0 \varepsilon E_i + P_i = \text{const}, \quad (2)$$

где U – напряжение между электродами, d_i – толщина i -го слоя.

При сделанных выше предположениях можно считать, что поляризация различных слоев происходит независимым образом и определяется величиной напряжения, "доставшегося" ему от общей величины U , приложенного ко всему образцу. Используя формулы (1) и (2) можно получить результирующую петлю гистерезиса для многослойного образца "суммированием" ординат петель отдельных слоев структуры. В общем случае сделать это достаточно сложно ввиду невозможности определения напряженности поля в каждом из слоев, а соответственно, невозможности определения не только параметров их петель гистерезиса, но даже типа петли (в частности, петли в отдельных слоях могут оказаться ненасыщенными). Лишь при достижении напряженности E_c^* , когда поляризация в любом сечении оказывается насыщенной возможно определение петли гистерезиса всего образца по предложенной выше схеме. Нетрудно показать, что величина коэрцитивного поля E_c^* (определенная из условия $D = 0$) и остаточная поляризация P_r^* (при $E = 0$) для материалов с изменяющимся составом, определяются соотношениями:

$$E_c^* = \frac{\sum d_i E_{ic}}{\sum d_i} = \frac{1}{d} \int E_c(z) dz ; \quad (3)$$

$$P_r^* = \frac{\sum P_{ir}}{N} = \frac{\int P_r(z) dz}{d} . \quad (4)$$

Проведенные исследования поляризационных характеристик многослойных образцов $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ показали, что вид и параметры экспериментальных петель удовлетворительным образом согласуются с теоретическими при использовании значений E_c и P_r , определенных для однородных материалов (рис. 2).

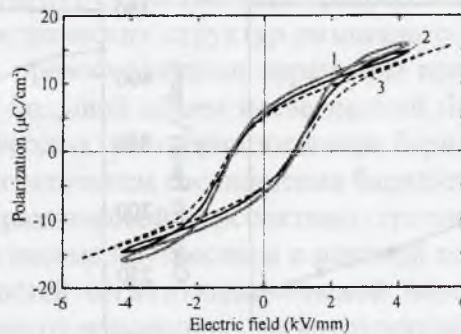


Рис. 2. Петли гистерезиса градиентных образцов BST-керамики: 1) $x = 0-0.3-0$; 2) $x = 0-0.3$; 3) расчетная петля для $x = 0-0.3$

Из изложенного выше следует, что поляризационные характеристики многослойных структур определяются лишь соотношением толщин слоев различного со-

става $\alpha_i = d_i/d$. Действительно, отличие петель гистерезиса для градиентных образцов с различной конфигурацией состава ($x = 0-0.3$ и $x = 0-0.3-0$) было незначительно (рис. 2). Ранее нами было показано, что диэлектрические характеристики исследуемых систем также носят "усредненный" характер, а поведение диэлектрической проницаемости удовлетворительно описывается соотношением $\varepsilon = \Sigma d_i / \Sigma (d_i / \varepsilon_i)$ [6]. Особо отметим, что сдвига петель гистерезиса (ни по оси P , ни по оси E) в исследуемых материалах обнаружено не было.

Список литературы

- [1] M.W. Cole, E. Ngo, S. Hirsch, J.D. Demaree, S. Zhong. S.P. Alpay. J. Appl. Phys. **102**, 034104 (2007).
- [2] M.Y. El-Naggar, K. Dayal, D.G. Goodwin, K. Bhattacharya. J. Appl. Phys. **100**, 114115 (2006).
- [3] J.V. Mantese, S.P. Alpay. Graded Ferroelectrics, Transpacitors and Transponents. Springer, New York, (2005). 153 p.
- [4] В.Н. Шут, И.Ф. Кашевич, С.Р. Сырцов. ФТТ **50**, 115 (2008).
- [5] V.N. Shut, S.R. Syrtsov, V.L. Trublovsky. Phase Transitions **83**, 368 (2010).
- [6] V.N. Shut, S.R. Syrtsov, V.L. Trublovsky, A.D. Poleyko, S.V. Kostomarov, L.P. Mastyko. Ferroelectrics **386**, 125 (2009).
- [7] В.Н. Шут, С.Р. Сырцов, В.Л. Трубловский, Б.А. Струков. Неорганические материалы **47**, 94 (2011).

К ВОПРОСУ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ГЕОРЕШЕТОК

Павлов А.П., Павлова Э.М.

Учреждение Российской академии наук

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия

alpavlov@mail.ru

Геосинтетические материалы – это материалы, которые в соответствии с их названием используются для армирования, то есть усиления грунтов. Основная задача при их исследовании состоит в прогнозировании прочности на весьма длительные времена нагружения (порядка 100 лет или 10^6 часов). Вполне естественно, что никакой эксперимент не в состоянии подтвердить (или опровергнуть) предлагаемые теоретические модели. Вообще геосинтетические материалы представляют собой ткани либо решетки определенной структуры. Экспериментальные трудности исследования их поведения достаточно велики, малейший перекоп либо выположение материала из захватов приводит к недостаточно точным оценкам. В результате может наблюдаться большой разброс данных. Поэтому ускоренные методы испытаний, связанные с повышением температуры эксперимента могут привести к большим ошибкам [1,2].

В настоящей работе показана возможность прогнозирования длительной прочности на большие времена нагружения (до 100 лет) при помощи модели наследственного типа. В качестве определяющего выбрано уравнение