

## ЭЛЕКТРОСТРИКЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ КЕРАМИКИ ТИТАНАТА-ЦИРКОНАТА БАРИЯ

© И.П.Пронин, Б.А.Ротенберг, Е.А.Тараканов

В последнее время широкое применение находят электрострикционные преобразователи, разработанные на основе сегнетоэлектриков с размытым фазовым переходом. Они сохраняют все преимущества пьезоэлектрических преобразователей и выгодно отличаются малым электромеханическим гистерезисом и остаточной деформацией, а также отсутствием деградации [1,2]. Однако и они не лишены недостатков. К ним относятся наличие электромеханического гистерезиса, узкий рабочий диапазон температур, вне которого существенно повышается гистерезис и падает значение коэффициента электрострикции, высокое значение диэлектрических потерь и т. д. [3]. В [4] показано, что в качестве электрострикционных материалов более эффективно использовать не свинецсодержащую керамику, обладающую вышеперечисленными недостатками, а керамику на основе титаната бария (в частности, твердые растворы титаната-станната бария (BST)), у которой электрострикционная деформация, сравнимая по величине с деформацией свинецсодержащей керамики (например, у системы PMN-PSN), отличается сильной нелинейностью диэлектрических свойств, меньшей величиной электромеханического гистерезиса и большим рабочим интервалом температур [4].

В настоящей работе с целью поиска электрострикционных материалов с оптимальными свойствами и изготовления из них позиционеров были исследованы электромеханические свойства керамики на основе титаната-цирконата бария  $BaZr_{0.9}Ti_{0.1}O_3$  с стабилизирующими добавками оксидов редкоземельных материалов, ниобия и др. (BZN). Разработанная технология получения данного материала [5] позволила реализовать равномерную микроструктуру, состоящую из кристаллических зерен размером 4–12 мкм. Температура спекания керамики составляла 1280–1300°C. Материал обладал равномерной пористостью порядка 6% с размерами пор, не превышающими 20 мкм.

Диэлектрические свойства сегнетокерамики представлены на рис. 1. Температура максимума диэлектрической проницаемости  $T_m$  лежит в районе комнатной температуры. Керамика характеризуется сильной нелинейностью ди-

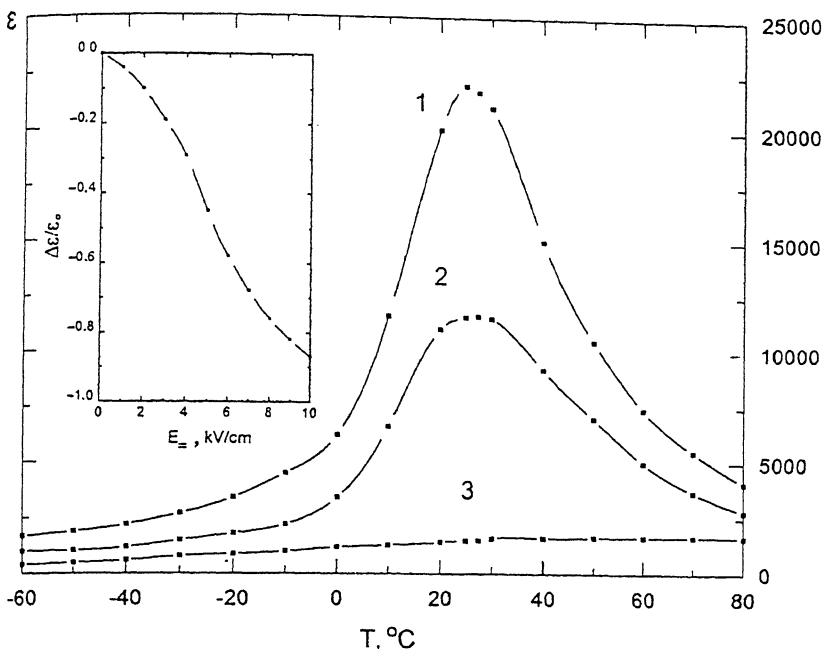


Рис. 1. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(T)$  керамики BZN в условиях приложения постоянного электрического поля  $E_ =$ : 1 — 0, 2 — 5, 3 — 10 кВ/см (на вставке: диэлектрическая нелинейность  $\Delta\varepsilon/\varepsilon_0$  ( $E_ =$ ), измеренная при 20°C).

электрической проницаемости (см. вставку на рис. 1). В таблице представлены наиболее важные для электромеханических свойств параметры материала, измеренные при комнатной температуре.

Электрические и тепловые параметры материала BZN, измеренные при комнатной температуре

Коэрцитивное поле, $E_c$ , кВ/см	0.5
Диэлектрические потери, $\text{tg}\delta$ , %	0.005–0.007
Пробивная прочность, $E_{\text{пр}}$ , кВ/см	60
Удельное объемное сопротивление, $\rho_v$ , ГОм·м	10–15
Коэффициент теплового расширения $\alpha$ , $10^{-6}$ , °C	7.8–7.9

Зависимость электрострикционной деформации от поля (рис. 2) носит монотонный характер и не имеет участков с резко меняющейся крутизной. Это оказывается важным для практических применений и выгодно отличает дан-

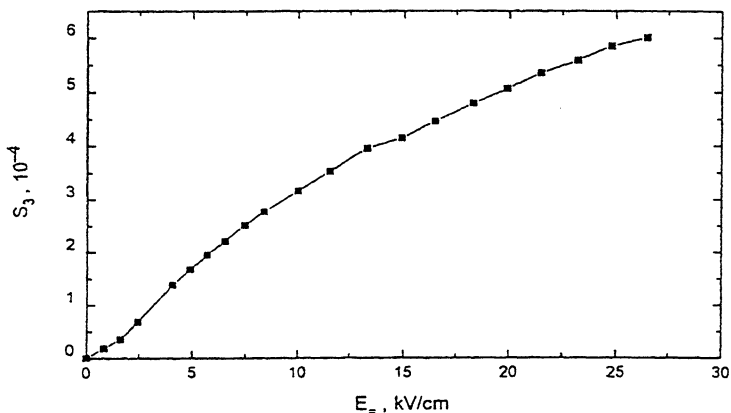


Рис. 2. Электрострикционная деформация  $S_3$  керамики BZN, измеренная при  $20^\circ\text{C}$ .

ный материал от предложенного в [3]. При низких полях ( $E \leq 10$  кВ/см) относительная продольная деформация материала  $S_3$  значительно ниже, чем для систем PMN-PSN и BST [2,3], но уже в поле  $\cong 35$  кВ/см составляет  $0.7 \cdot 10^{-3}$  и, таким образом, практически не уступает величинам  $S_3$  у приведенных выше систем. Насыщение характеристики происходит при полях, близких к пробойным.

Гистерезис на зависимости  $S_3(E_-)$  практически отсутствует. Это может быть связано с двумя причинами. Во-первых, с низкими значениями коэрцитивного поля  $E_c$  (что характерно для твердых растворов на основе титаната бария, см. таблицу), в результате чего электромеханический гистерезис, вызванный обратимой переориентацией  $90^\circ$  доменных стенок, может быть локализован лишь на самом начальном участке зависимости  $S_3(E_-)$ . Во-вторых, с близостью у рассматриваемого материала сегнетоэлектрического фазового перехода к фазовым переходам второго рода [6], для которых характерен минимальный электромеханический гистерезис в температурной области, примыкающей к температуре Кюри [7].

Согласно [8], температурная область в районе температуры Кюри для составов, близких к  $\text{BaZr}_{0.9}\text{Ti}_{0.1}\text{O}_3$ , рассматривается как область с нечеткой симметрией, в которой сосуществуют как сегнетоэлектрические ромбоэдрическая и тетрагональная фазы, так и параэлектрическая фаза [6]. Это отражается на температурной зависимости  $S_3(T)$ , где можно различить два пологих максимума — при  $15$  и  $-5^\circ\text{C}$  (рис. 3). Высокотемпературный максимум связывается на-

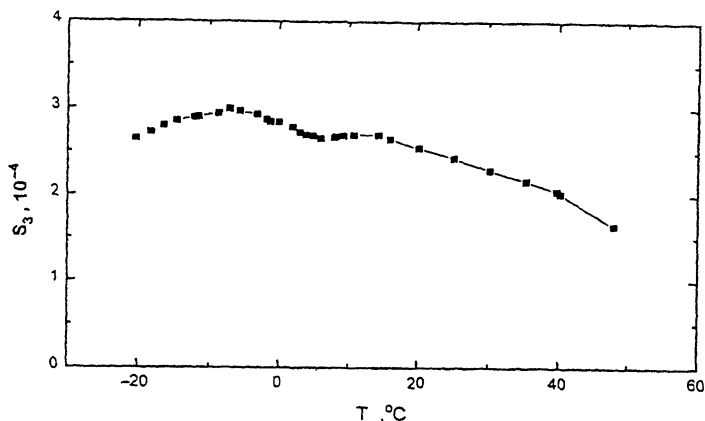


Рис. 3. Температурная зависимость электрострикционной деформации  $S_3$ , измеренная в поле 20 кВ/см.

ми с фазовым переходом из более высокотемпературной сегнетоэлектрической тетрагональной фазы в низкотемпературную ромбоэдрическую фазу. Низкотемпературный максимум обычно связывается с уменьшением вклада электрострикционной деформации при понижении температуры [4]. Как видно, электрострикционная деформация в BZN слабо меняется в исследуемом интервале температур (от  $-20$  до  $40^\circ\text{C}$ ) и характеризуется отсутствием температурного гистерезиса.

На основе данного материала с применением технологии производства конденсаторов на основе керамических пленок были изготовлены блоки для создания активного элемента преобразователя перемещений. Габариты соответствовали размерам  $x \times y \times z = 10 \times 12 \times 6$  мм, начальная емкость при нулевом управляющем напряжении составляла 13.5 мкФ, толщина слоев в блоке была 100 мкм, рабочее напряжение не превышало 400 В. В качестве электродов использовались палладиевые слои толщиной 3–5 мкм, представляющие собой встречно-штыревую структуру с выводом электродов на боковые ( $xz$ ) грани блока. Деформация блока измерялась вдоль приложенного электрического поля по оси  $z$ . Выбор толщины керамического слоя определялся условием достижения механической деформации при требуемом рабочем напряжении. Реально достижимым значением являлась толщина слоя 50 мкм, однако при такой толщине слоев ухудшались энергетические параметры из-за пропорционального увеличения емкости при утоньшении слоев. Результаты измерений показали, что

основные диэлектрические и электромеханические характеристики блоков соответствуют параметрам, полученным при исследовании объемных образцов.

Нагрузочная характеристика привода, состоящего из двух последовательно включенных по перемещению керамических блоков BZN, носила линейный характер. Эффективное значение модуля Юнга составляло  $85 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>. Предельное быстродействие преобразователя ограничивалось, с одной стороны, частотой первого механического резонанса, определяемой интерференционным методом по смещению поверхности привода при подаче напряжения звуковых частот и равной 60 кГц для привода данной конфигурации. С другой стороны, при больших перемещениях привода частотные ограничения накладывались и источником питания, работающим на большую емкостную нагрузку. Сильная полевая нелинейность диэлектрической проницаемости облегчала режимы работы источников питания устройств с использованием данного материала при преобразовании электрическое поле—деформация вследствие понижения емкости при больших рабочих напряжениях. Зависимость величины перемещения от приложенного напряжения  $\Delta l(U)$  практически полностью повторяла ход кривой  $S_3(E_-)$ , которая при 350 В достигала величины 5 мкм. Эффективный пьезомодуль, определяемый как  $d_{33\text{эфф}} = \Delta l/U$ , составлял  $\approx 1.4 \cdot 10^{-10}$  м/В в поле 35 кВ/см.

При использовании электрострикционных преобразователей в конкретных устройствах для микропозиционирования (микроэлектроника, адаптивная оптика, точное машиностроение, лазерная техника) важным требованием является отсутствие электромеханического гистерезиса в широком интервале температур. Видно, что преобразователь работоспособен в диапазоне температур от  $-15$  до  $20^\circ\text{C}$ , причем без уменьшения диапазона рабочих перемещений его можно сдвинуть в пределах  $10-15^\circ\text{C}$ . Нормированная преобразовательная характеристика при этом меняется незначительно.

Таким образом, изготовленный тонкопленочный преобразователь на базе керамики BZN обладал комплексом оптимальных свойств: обеспечивал любой разумный диапазон перемещений, характеризовался отсутствием электромеханического гистерезиса, большими развиваемыми усилиями, широким диапазоном рабочих температур, а также высокой временной стабильностью, что существенно расширяет сферу использования данного материала и различных микроманипуляторов на его основе.

## Список литературы

- [1] *Cross L.E., Jang S.J., Newham R.E. et al.* // *Ferroelectrics*. 1980. V. 23. P. 187.
- [2] *Смоленский Г.А., Исупов В.А., Юшин Н.К.* // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1987. Т. 51. В. 10. С. 1742-1747.
- [3] *Смирнова Е.П., Парфенова Н.Н., Зайцева Н.В.* // *ФТТ*. 1983. Т. 25. В. 6. С. 1830-1833.
- [4] *Von Geminski J., Landhammer H.Th., Abicht H.-P.* // *Phys. Stat. Sol.* 1990. V. 120. P. 285-293.
- [5] *Ротенберг Б.А., Дорохова М.П., Дитенкова Т.А. и др.* // *Электронная техника. Сер. Радиодетали и радиокомпоненты*. 1989. В. 3(76). С. 3-6.
- [6] *Hennings D., Schnell A., Simon G.* // *J. Amer. Ceram. Soc.* 1982. V. 65. N 11. P. 539-544.
- [7] *Von Geminski J.* // *Ferroelectrization (Martin-Luther Univ., Halle)*. 1990. V. 37. P. 59-66.
- [8] *Вербицкая Т.Н., Жданов Г.С., Веневцев Ю.Н. и др.* // *Кристаллография*. 1958. Т. 3. В. 2. С. 186-195.

Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе РАН  
С.-Петербург

Поступило в Редакцию  
14 августа 1996 г.