

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ/TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR THE PRODUCTION OF MATERIALS AND ELECTRONIC DEVICES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.12>

ПОЛУЧЕНИЕ, СТРУКТУРНЫЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СО СТРУКТУРОЙ ПЕРОВСКИТА, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В СИСТЕМЕ $(1-X)(0,35\text{BiScO}_3 \cdot 0,65\text{PbTiO}_3) \cdot X(0,68\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3 \cdot 0,32\text{PbTiO}_3)$

Научная статья

Федулов Д.Ю.^{1,*}, Каменцев К.Е.², Буш А.А.³¹ ORCID : 0000-0003-4864-9784;¹ АО «НИИ «Элпа», Москва, Российская Федерация^{2,3} Российский технологический университет МИРЭА, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (d.feduloff[at]yandex.ru)

Аннотация

На синтезированных керамических образцах тройной системы $\text{BiScO}_3 - \text{PbTiO}_3 - \text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ (BS – PT– PMN), составы которых лежат на разрезе $(1-x)(0,35\text{BS} \cdot 0,65\text{PT}) \cdot x(0,68\text{PMN} \cdot 0,32\text{PT})$, $0 \leq x \leq 1$ внутри морфотропной фазовой области, проведены рентгенодифракционные, диэлектрические и пьезоэлектрические исследования, а также изучение токов термостимулированной деполяризации (ТТСД). Установлено, что образцы представляют собой сосуществующие твердые растворы со структурой перовскита разной симметрии. Получены данные о концентрационных зависимостях параметров элементарной ячейки твердых растворов тетрагональной симметрии, диэлектрических и пьезоэлектрических характеристик, ТТСД образцов. Установлено, что в образцах с $0 \leq x \leq 0,20$, $0,45 \leq x \leq 0,55$ и $0,60 \leq x \leq 1$ преобладают соответственно сегнетоэлектрические свойства с размытым фазовым переходом, сегнетоэлектрические-релаксорные свойства и релаксорные свойства; максимальные значения пьезомодуля $d_{33}=540$ пКл/Н имеют образцы с $x \approx 0,50$.

Ключевые слова: система $\text{BiScO}_3\text{--PbTiO}_3\text{--PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$, сегнетоэлектрики, сегнетоэлектрики–релаксоры, твердые растворы, пьезокерамика, ди-электрические свойства, токи термостимулированной деполяризации.

PREPARATION, STRUCTURAL AND ELECTROPHYSICAL STUDIES OF CERAMIC SAMPLES OF SOLID SOLUTIONS WITH A PEROVSKITE STRUCTURE FORMED IN THE SYSTEM $(1-X(0.35\text{BiScO}_3 \cdot 0.65\text{PbTiO}_3) \cdot X(0.68\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3 \cdot 0.32\text{PbTiO}_3)$

Research article

Fedulov D.U.^{1,*}, Kamentsev K.Y.², Bush A.A.³¹ ORCID : 0000-0003-4864-9784;¹ JSC Research Institute Elpa, Moscow, Russian Federation^{2,3} MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (d.feduloff[at]yandex.ru)

Abstract

On synthesized ceramic samples of the triple system $\text{BiScO}_3 - \text{PbTiO}_3 - \text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ (BS – PT– PMN), whose compositions lie on the section $(1-x)(0.35\text{BS} \cdot 0.65\text{PT}) \cdot x(0.68\text{PMN} \cdot 0.32\text{PT})$, $0 \leq x \leq 1$ within the morphotropic phase region, X-ray diffraction, dielectric and piezoelectric studies were carried out, as well as a survey of thermally stimulated depolarisation currents (TSDC). It was established that the samples are coexisting solid solutions with a perovskite structure of different symmetry. Data were obtained on the concentration dependencies of the parameters of the unit cell of solid solutions with tetragonal symmetry, dielectric and piezoelectric characteristics, and TTSD of the samples. It was established that in samples with $0 \leq x \leq 0.20$, $0.45 \leq x \leq 0.55$, and $0.60 \leq x \leq 1$, ferroelectric properties with a smeared phase transition, ferroelectric-relaxor properties, and relaxor properties prevail, respectively; The maximum piezoelectric modulus $d_{33}=540$ pC/N was observed in samples with $x \approx 0.50$.

Keywords: $\text{BiScO}_3\text{--PbTiO}_3\text{--PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ system, ferroelectrics, ferroelectric relaxors, solid solutions, piezoceramics, dielectric properties, thermally stimulated depolarisation currents.

Введение

Твердые растворы со структурой перовскита, образующиеся в тройной системе $\text{BiScO}_3 - \text{PbTiO}_3 - \text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ (BS – PT – PMN), вызывают интерес в связи с их перспективными для практических применений пьезоэлектрическими свойствами [1], [4], [8], [10]. Как и во многих других пьезоэлектрических оксидных системах [11], [12], [13], наиболее высокие пьезоэлектрические характеристики проявляют составы, лежащие вблизи или внутри морфотропной фазовой области (МФО), которая разделяет твердые растворы кубической и тетрагональной симметрии. В результате исследований твердых растворов разрезов $(1-2x)\text{BS} \cdot x(2-y)\text{PT} \cdot xy\text{PMN}$ с $y=0; 0,5; 0,9; 1,0; 1,2$ [2], [3], [5], [6], [7] с учетом данных по диаграммам состояний систем BS–PT и PMN–PT [14], [15], [16], [17] построена диаграмма фазовых состояний тройной системы, определяющая в ней положение МФО [9]. Установлено, что в концентрационном треугольнике системы BS – PT – PMN она лежит между линиями, соединяющими составы $0,65\text{PMN} \cdot 0,35\text{PT} - 0,32\text{BS} \cdot 0,68\text{PT}$ и $0,70\text{PMN} \cdot 0,30\text{PT} - 0,40\text{BS} \cdot 0,60\text{PT}$ (рис. 1).

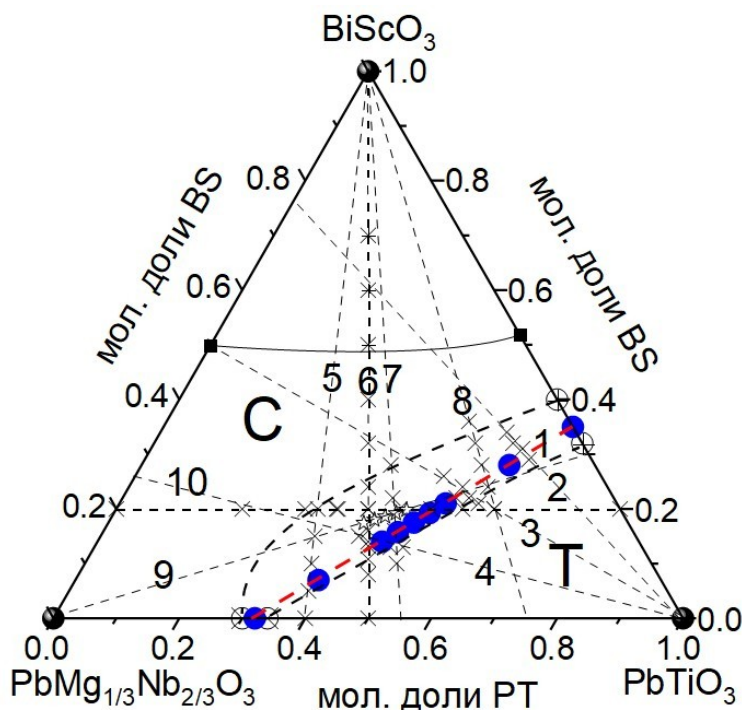


Рисунок 1 - Концентрационный треугольник системы BS–PT–PMN $((1-2x)BS \cdot (2-y)xPT \cdot yxPMN)$
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.12.1>

Примечание: пунктирными линиями 1 и 2–4, 5–8, 9, 10 показаны разрезы, изучаемые в настоящей работе и работах [1], [2], [3], [4], [5], а также в работах [6], [7], [8], [9] и [10] соответственно; C и T обозначают области составов, в которых образуются твердые растворы с кубической и тетрагональной кристаллической решеткой, МФО и область неоднородности выделены светло-серым и темно-серым цветами соответственно; границы МФО в двойных системах PT–PMN и BS–PT приведены по данным [14], [15], [16], [17]

Настоящая работа посвящена получению, структурным и электрофизическим исследованиям образцов разреза $(1-x)(0,35BS \cdot 0,65PT) \cdot x(0,68PMN \cdot 0,32PT)$ с $0 \leq x \leq 1$ системы BS – PT – PMN, составы которого, в отличие от изученных ранее разрезов [1], [2], [3], [4], [5], а также в работах [6], [7], [8], [9] и [10] соответственно, не пересекает МФО, а лежат внутри нее (рис. 1). Изучение образцов такого разреза позволяет получить более полные сведения о структуре и свойствах твердых растворов, составы которых лежат в МФО, о влиянии вариаций состава образцов внутри МФО на их свойства.

Получение образцов и методы их исследований

2.1. Получение керамики

Образцы разреза тройной системы BS – PT – PMN, представляющие собой твердые растворы состава $(1-x)(0,35BS \cdot 0,65PT) \cdot x(0,68PMN \cdot 0,32PT)$ при варьировании параметра x от 0 до 1, были получены с использованием стандартной керамической технологии. Составы синтезированных образцов показаны на концентрационном треугольнике темными кружками (рис. 1). Синтез проводился с использованием следующих исходных материалов:

- оксиды висмута (Bi_2O_3 , ос. ч.);
- скандия (Sc_2O_3 , ОС-99,9%);
- свинца (Pb_3O_4 , ч.д.а.);
- титана (TiO_2 , ос. ч.);
- магния (MgO , ч);
- ниобия (Nb_2O_5 , ос. ч.).

Компоненты, взятые в количествах, соответствующих стехиометрии, были объединены и гомогенизированы путем растирания в агатовой ступке в присутствии этилового спирта. Образцы смесей подвергались термической обработке при $1100^\circ C$ в течение 4,5 часов. Обжиг проводился в алуновом тиглях, крышки которых не были полностью герметизированы. После обжига полученные материалы были измельчены и смешаны с 5% водного раствора поливинилового спирта. Из этой пластичной массы методом одноосного прессования под давлением 40 МПа были сформированы цилиндрические диски диаметром 10 мм и толщиной от 1 до 2 мм. Заготовки спекали при $T = 1190^\circ C$ в течение $t = 4,5$ ч в засыпке из того же материала для предотвращения изменения состава вследствие летучести оксидов PbO и Bi_2O_3 при высоких температурах. В результате получены керамические образцы в виде цилиндрических дисков диаметром около 10 мм и толщиной 1–2 мм, плотность дисков составляла 90–95% от рентгеновской.

На спеченные диски для электрофизических исследований были нанесены электроды из серебряной пасты методом вжигания. Процесс поляризации образцов для изучения пьезоэлектрического эффекта и ТТСД включал воздействие постоянным электрическим полем напряженностью 40 кВ/см на протяжении 20 минут при комнатной температуре. Последующие измерения пьезоэффекта и ТТСД осуществлялись после двух-трехдневной выдержки поляризованных образцов при комнатной температуре.

Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов выполнялся на дифрактометре ДРОН-4-07 с использованием характеристического излучения $\text{CuK}\alpha$. В качестве внутреннего эталона для калибровки дифрактограммы применялся порошок кристаллического германия (Ge).

Исследование диэлектрических свойств синтезированных образцов, а именно их диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\tan\delta$, осуществлялось с использованием измерителя иммитанса Е7-30, разработанного в МНИПИ (Беларусь). Измерения проводились в широком диапазоне температур, от 295 до 700 К, и частот, охватывающих интервал от 25 Гц до 1 МГц.

Определение пьезомодуля d_{33} на предварительно поляризованных образцах проводили квазистатическим методом на частоте 110 Гц с использованием прибора "Piezoelectric d_{33} meter, model YE2730A" (Sinocera Piezotronics, INC, China).

Для исследования токов термостимулированной деполяризации (ТТСД) образцы нагревались со скоростью 0,2–0,4 К/с в диапазоне температур от 300 до 700 К. Процесс измерений был реализован в режиме короткого замыкания с использованием универсального вольтметра В7-30.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

3.1. Результаты рентгеновского фазового анализа (РФА)

Идентификация рефлексов на дифрактограммах образцов позволила установить их принадлежность к твердым растворам перовскитной структуры. Рефлексов от примесной фазы со структурой пироклора, присутствие которой характерно для образцов изучаемой системы [9], [10], [22], не наблюдается. Положения основных пиков на дифрактограммах соответствуют тетрагональной элементарной ячейке с параметрами $a = 3,99 \text{ \AA}$, $c = 4,05 \text{ \AA}$ (рис. 2). При увеличении x (уменьшении содержания BS и PT, увеличении содержания PMN) происходит рост параметра a и уменьшение параметра c , что вызывает уменьшения тетрагонального искажения кристаллической решетки c/a от 1,030 до 1,011 (рис. 2). Параметр приведенной элементарной ячейки $a_p = (a^2c)^{1/3}$ остается при этом практически неизменным. Такое поведение вызвано, очевидно, тем, что в изучаемых твердых растворах с ростом x средний размер катиона в позиции А увеличивается ($r(\text{A}^{n+}) = r(\text{Bi}^{3+}_{0,35}\text{Pb}^{2+}_{0,65}) = 1,462 \text{ \AA} \rightarrow r(\text{Pb}^{2+}) = 1,49 \text{ \AA}$), а в позиции В — уменьшается ($r(\text{Sc}^{3+}_{0,35}\text{Ti}^{4+}_{0,65}) = 0,745 \text{ \AA} \rightarrow r(\text{Mg}^{2+}_{0,227}\text{Nb}^{5+}_{0,453}\text{Ti}^{4+}_{0,32}) = 0,69176 \text{ \AA}$) [18].

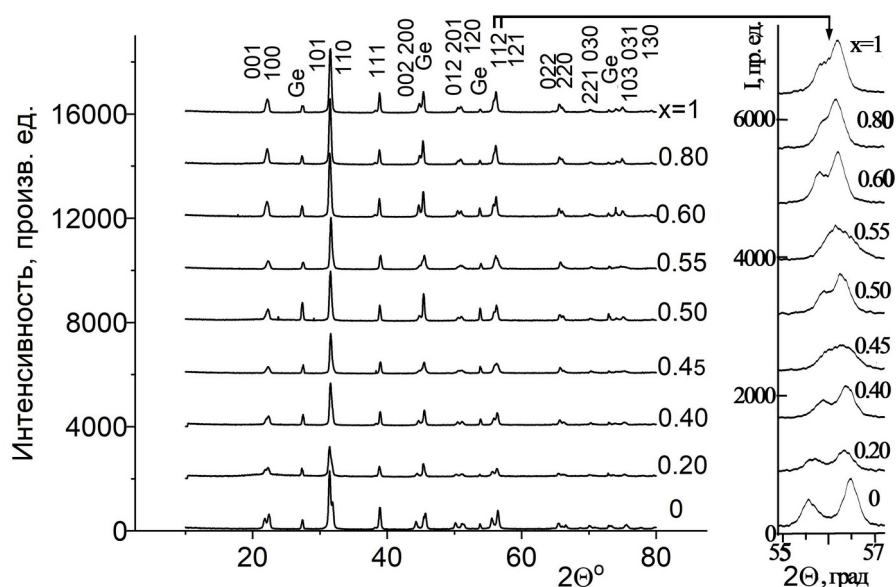


Рисунок 2 - Дифрактограммы измельченных в порошок керамических образцов $(1-x)(0,35\text{BS}, 0,65\text{PT}) \cdot x(0,68\text{PMN}, 0,32\text{PT})$ с добавленным к ним порошком кристаллов Ge в качестве внутреннего эталона

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.12.2>

Результаты прецизионного индирования дифрактограмм показывают, что, помимо указанных выше тетрагональных твердых растворов, в образцах присутствуют другие твердые растворы со структурой перовскита. Их присутствие проявляется в наличии на дифрактограммах пиков, которые не индицируются в рамках указанной тетрагональной элементарной ячейки. Таким образом, РФА показывает, что синтезированные образцы состоят из сосуществующих разных твердых растворов со структурой перовскита. Наложение друг на друга рефлексов от разных перовскитоподобных фаз затрудняет определение параметров элементарной ячейки присутствующих в образцах дополнительных твердых растворов. Для их определения требуется проведение дополнительных рентгеноструктурных исследований методом Ритвельда.

Заклучение о сосуществовании в образцах разных твердых растворов со структурой перовскита соответствует приводимым в [6], [7], [9], а также в [19], [20], [21], [22] результатам рентгеноструктурного анализа по методу Ритвельда, согласно которым образцы системы BS – BPT – PMN, составы которых лежат в МФО, состоят из двух или в некоторых случаях из трех перовскитоподобных фаз, при этом в образцах с повышенным содержанием BS основная фаза имеет кубическую симметрию, а дополнительная фаза — тетрагональную или моноклинную симметрию; в образцах с пониженным содержанием BS основная фаза имеет тетрагональную симметрию, а дополнительная — кубическую.

3.2. Результаты электрофизических измерений

Исследование зависимостей $\varepsilon(T)$ выявило наличие выраженных пиков, положение которых меняется от 735 К до 420 К при увеличении параметра x . Эти пики коррелируют с максимумами на зависимостях $\tan\delta(T)$ (рис. 4, 5). В условиях высоких температур ($T \geq 600$ К) и/или низких частот ($f \leq 100$ кГц) для образцов с $x \leq 0,20$ наблюдается резкое увеличение значений ε и $\tan\delta$. Эти изменения сопровождаются пиками и перегибами, что, предположительно, связано с возрастанием проводимости и релаксационными механизмами поляризации, в которых участвуют кислородные вакансии [23].

Для концентраций $x \leq 0,20$, максимумы на зависимости диэлектрической проницаемости ε от температуры T демонстрируют слабую зависимость от частоты измерительного поля f (рис. 3, 4). Эти максимумы, как полагают, связаны с сегнетоэлектрическими фазовыми переходами в твердых растворах и определяют их точку Кюри T_C . Это заключение подтверждается результатами измерений зависимостей ТТСД(T), на которых имеются выраженные максимумы при температурах T_p , лежащих на ~ 10 К ниже T_C (рис. 4, нижние панели); выше T_C ТТСД уменьшаются до низких значений (рис. 4), что характерно для сегнетоэлектрических фазовых переходов. Существенное размытие максимума на зависимостях $\varepsilon(T)$ (его ширина на половине высоты (ΔT_ε) равна 50 К для $x=0$, и 118 К для $x=0,20$) позволяет заключить, что твердые растворы с $x \leq 0,20$ относятся к сегнетоэлектрикам с размытым фазовым переходом (СЭ РФП). Размытие фазового перехода вызвано, очевидно, композиционным разупорядочением в структуре твердых растворов, возникающим из-за того, что эквивалентные структурные позиции в них заняты катионами разного типа (в А-позиции – Pb^{2+} и Bi^{3+} , в В-позиции – Sc^{3+} , Ti^{4+} , Mg^{2+} , Nb^{5+}).

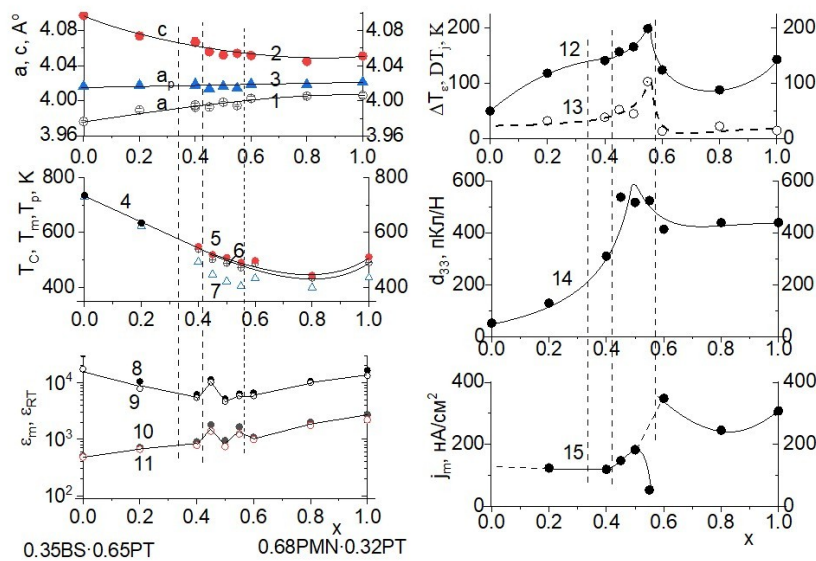


Рисунок 3 - Концентрационные зависимости для твердых растворов $(1-x)(0,35\text{BS} \cdot 0,65\text{PT}) \cdot x(0,68\text{PMN} \cdot 0,32\text{PT})$
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.12.3>

Примечание: параметров тетрагональной элементарной ячейки a (1), c (2) и $a_p=(a^2c)^{1/3}$ (3); точки Кюри T_C (4); температуры релаксационного максимума на зависимости $\varepsilon(T)$ при $f=1$ kHz (T_{m1} – 5) и $f=100$ kHz (T_{m2} – 6); температуры максимума на зависимости ТТСД(T) – T_p (7); величины ε в максимуме при T_C или T_{m2} на частоте 1 кГц (8) и 100 кГц (9); величины ε при комнатной температуре для $f=1$ кГц (10) и 100 кГц (11); ширины максимума на зависимостях $\varepsilon(T)$ и $j(T)$ на половине их высоты ΔT_ε – 12 и ΔT_j – 13; пьезомодуль d_{33} при 296 К (14); величины максимума на зависимости ТТСД(T) – j_m (15)

Основной вклад, вносимый в измеряемые ТТСД при $T \leq 600$ К сегнетоэлектрических образцов с $x=0-0,20$, имеет пирозлектрическую природу, он возникает из-за изменения с температурой спонтанной поляризации P_s сегнетоэлектрической фазы и равен $I_p = S(dP_s/dT)(dT/dt)$, S — площадь электрода, (dT/dt) — скорость изменения температуры образца. Поэтому положение максимума на зависимости ТТСД(T) лежит ниже T_C , при этом с ростом x от 0 до 0,20 (и соответственно размытия фазового перехода) разность $(T_C - T_p)$ увеличивается от 5 К до 11 К (рис. 3, 4). Аномально высокое значение плотности тока $j_p = I_p/S$ для образца с $x=0$, по сравнению с величинами токов для образцов других составов, вызвано, по всей видимости, его повышенной проводимостью.

Диэлектрические свойства образца $x=0,40$ приобретают некоторые (но не все) особенности, присущие сегнетоэлектрикам-релаксорам (СЭР). Положение максимума T_m на зависимости $\epsilon(T)$ смещается с ростом частоты на ~ 10 К, при этом зависимость $T_m(f)$ не подчиняется характерному для СЭР соотношению Фогеля-Фулчера [24]; практически отсутствует дисперсия ϵ ниже T_m . Положение максимума ТТСД(T) лежит ниже T_m на ~ 50 К, поэтому максимум зависимости $\epsilon(T)$ не связан с сегнетоэлектрическим фазовым переходом, как это имело место для образцов с $x=0-0,20$. По всей видимости, максимум диэлектрической проницаемости релаксационного характера связан с присутствием в образцах неполярных кубических твердых растворов, а выраженный максимум на зависимости ТТСД(T) — с присутствием в образцах дополнительных полярных тетрагональных твердых растворов.

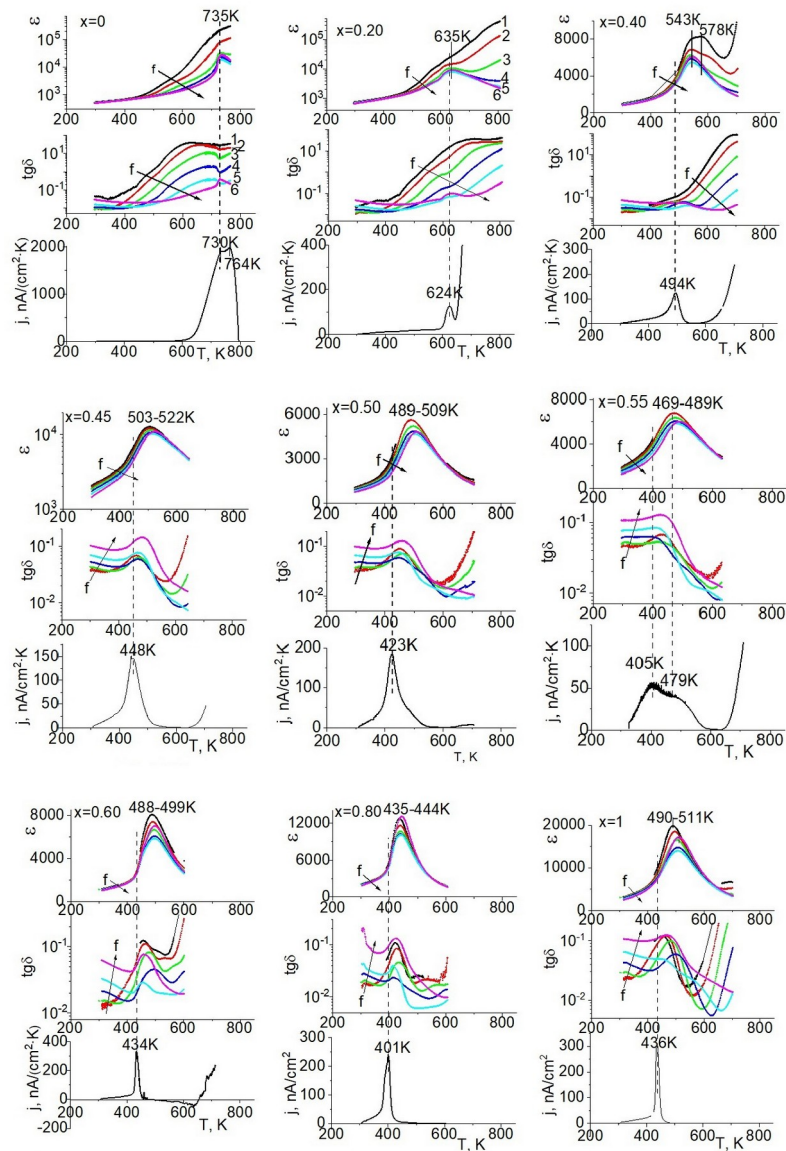


Рисунок 4 - Зависимости $\epsilon(T)$, $\text{tg}\delta(T)$ и ТТСД(T) образцов $(1-2x)\text{BS} \cdot (2-y)x\text{PTyх PMN}$

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.12.4>

Примечание: измерения ϵ и $\text{tg}\delta$ выполнены на частоте $f=25$ Гц (кривые 1), 120 Гц (2), 1 кГц (3), 10 кГц (4), 100 кГц (5), 1000 кГц (6)

При $0,45 \leq x \leq 0,55$ положение максимума диэлектрической проницаемости T_m существенно зависит от частоты измерительного поля f , оно смещается с частотой в сторону высоких температур на ~ 20 К (рис. 3–5), что указывает на его релаксационный характер. Образцы этих составов проявляют особенности, характерные для СЭР типа PMN [24]: наличие на их зависимости $\epsilon(T)$ широкого максимума, положение которого T_m смещается с ростом частоты f в сторону высоких температур; проявление выраженной дисперсии ϵ при $T < T_m$; наличие на зависимостях $\text{tg}\delta(T)$ типичных для СЭР широких платообразных максимумов при температурах, лежащих на 40–50 К ниже T_m и простирающихся в область низких температур (рис. 4); подчинение зависимости $T_m(f)$ характерному для СЭР соотношению Фогеля-Фулчера

$$f = f_0 \exp [E_a/k_B (T_m - T_{VF})] ,$$

где:

k_B — константа Больцмана;

f_0 , E_a , T_{VF} — подгоночные параметры, связываемые для канонического СЭР PMN с частотой попыток преодоления потенциального барьера, энергией активации, температурой Фогеля-Фулчера, ниже которой происходит замораживание динамики электрических диполей и переход СЭР из эргодического в неэргодическое состояние [24]. Определенные при фиттировании соотношением Фогеля-Фулчера зависимостей $T_m(f)$ параметры f_0 , E_a , T_{VF} имеют сопоставимые с аналогичными параметрами для известных СЭР порядки величин (рис. 5). Учитывая эти данные, а также литературные данные [1], [2], [3], [4], [5], а также [6], [7], [8], [9], [10], можно заключить, что образцы составов $0,45 \leq x \leq 0,55$ проявляют СЭР свойства.

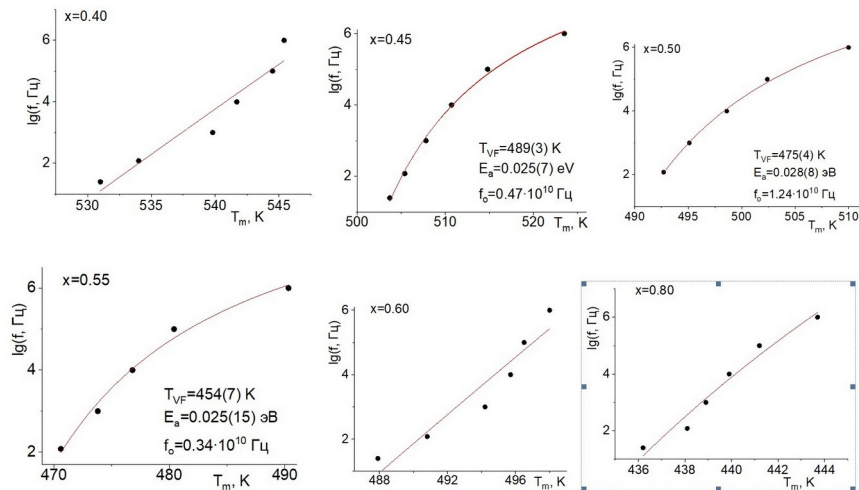


Рисунок 5 - Зависимости $T_m(f)$ для образцов $(1-x)(0,35\text{BS} \cdot 0,65\text{PT}) \cdot x(0,68\text{PMN} \cdot 0,32\text{PT})$ с $x=0,40-0,80$

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.12.5>

Примечание: экспериментальные данные показаны темными точками, линиями приведены результаты аппроксимации зависимостей формулой Фогеля–Фулчера

Для СЭР составов положение максимума на зависимости $\text{ТТСД}(T)$ лежит по отношению к температуре максимума ϵ гораздо ниже ($(T_m - T_p)$ достигает 50–90 К), чем для СЭ составов (рис. 3, 4). Наличие таких выраженных максимумов на зависимостях $\text{ТТСД}(T)$ образцов с СЭР свойствами можно объяснить или присутствием в них дополнительной сегнетоэлектрической фазы или деполяризацией полярного состояния образцов, возникающего из-за некоторого упорядочения ориентации электрических диполей полярных нанодоменов СЭР под действием поляризирующего электрического поля при охлаждении образца до температур ниже температуры замерзания $T < T_{VF}$ [25], [26], [27], [28].

Низкое значение максимума ТТСД образца с $x=0,55$, его большая ширина и наличие, как минимум двух компонент, коррелируют с заметным размытием рентгеновских пиков на дифрактограмме этого образца (рис. 2).

Рост x выше 0,55 вызывает исчезновение характерных для СЭР особенностей диэлектрических свойств:

- существенное уменьшение дисперсии ϵ при $T < T_m$ (практически до ее отсутствия);
- уменьшение смещения T_m с ростом частоты (ΔT_{ef}) от 20 К до 10 К;
- появление выраженных максимумов на зависимостях $\text{tg}\delta(T)$, соответствующих максимумам на зависимостях $\epsilon(T)$ (рис. 2–4);

– прекращение выполнения соотношения Фогеля-Фулчера для зависимости $T_m(f)$ (рис. 5).

Однако при этом максимум на зависимости $\epsilon(T)$ не становится связанным с сегнетоэлектрическим фазовым переходом, поскольку довольно острый максимум на зависимости $\text{ТТСД}(T)$ лежит существенно ниже температуры диэлектрического максимума (на 50–70 К) (рис. 3, 4). По всей видимости, в этих образцах максимум зависимости $\epsilon(T)$ вызван присутствием в образцах неполярных кубических твердых растворов, а максимум на зависимости $\text{ТТСД}(T)$ – присутствием в образцах дополнительных полярных твердых растворов тетрагональной симметрии. Можно заметить, что сегнетоэлектрический фазовый переход проявляется на зависимости $\epsilon(T)$ образцов с $x=0,60$ и $0,80$ в виде излома при ~ 445 К, положение которого на ~ 8 К выше T_p . Такая разница ($T_c - T_p$) вполне соответствует СЭ РФП, поскольку T_p определяется производной dP/dT , максимум которой для СЭ РФП может лежать заметно ниже температуры СЭ ФП.

Обнаруженная последовательность изменения диэлектрических свойств образцов $(1-x)(0,35\text{BS} \cdot 0,65\text{PT}) \cdot x(0,68\text{PMN} \cdot 0,32\text{PT})$ с ростом x (СЭ РФП \rightarrow СЭР \rightarrow релаксорные + СЭ) можно объяснить тем, что композиционное разупорядочение в твердых растворах изменяется с концентрацией, при этом оно достигает

максимальных значения для промежуточных составов, составы крайних компонент $0,35\text{BS}\cdot 0,65\text{PT}$, $0,68\text{PMN}\cdot 0,32\text{PT}$ и прилегающие к ним составы характеризуются, очевидно, меньшей разупорядоченностью.

Рисунок 3 иллюстрирует, как концентрация влияет на различные характеристики материалов, включая температуру Кюри (T_c), температуру плавления (T_m), температуру фазового перехода (T_p), максимальное значение диэлектрической проницаемости (ϵ_m) при T_c или T_m , диэлектрическую проницаемость при 296 К (ϵ_{RT}), ширину максимумов на зависимостях $\epsilon(T)$ и ТТСД(T) на половине их высоты (ΔT_ϵ и ΔT_j), а также величину пьезомодуля d_{33} и максимальное значение ТТСД j_m . В области составов, демонстрирующих сегнетоэлектрические (СЭР) свойства, эти зависимости ведут себя немонотонно. Примечательно, что в этой области значения d_{33} достигают максимума, доходя до 540 пКл/Н при $x \approx 0,5$.

Заключение

1. Образцы тройной системы BS – PT – PMN были изготовлены с использованием стандартных керамических методов. Составы этих образцов располагаются в пределах области МФО на разрезе, определяемом формулой $(1-x)(0,35\text{BS}\cdot 0,65\text{PT})\cdot x(0,68\text{PMN}\cdot 0,32\text{PT})$.

2. Анализ РФА показал, что исследуемые образцы представляют собой смесь твердых растворов с перовскитной структурой, но с различной симметрией. Индицирование дифрактограмм позволило установить параметры элементарной ячейки для тетрагональных твердых растворов.

3. Проведенные исследования температурно-частотных зависимостей диэлектрической проницаемости (ϵ) и тангенса угла потерь ($\text{tg}\delta$) твердых растворов в температурном интервале 295–700 К и частотном диапазоне 25 Гц–1 МГц, а также анализ их температурных зависимостей диэлектрических свойств (ТТСД) в области 300–700 К, позволили классифицировать поведение материалов. Было установлено, что образцы с концентрациями x в интервалах $0 \leq x \leq 0,20$, $0,45 \leq x \leq 0,55$ и $0,60 \leq x \leq 1$ характеризуются соответственно сегнетоэлектрическими свойствами с размытым фазовым переходом, смешанными сегнетоэлектрическо-релаксорными свойствами и чисто релаксорными свойствами. Образцы с $x=0,40$ демонстрируют переходные свойства, сочетающие черты сегнетоэлектрических с размытым фазовым переходом и сегнетоэлектрическо-релаксорных.

4. В процессе изучения твердых растворов были выявлены закономерности изменения параметров тетрагональной элементарной ячейки и электрофизических характеристик в зависимости от концентрации. Среди исследованных электрофизических свойств — температурные зависимости диэлектрической проницаемости и ТТСД, а также их экстремальные значения (пики) и ширины, наряду с абсолютными значениями диэлектрической проницаемости и пьезомодуля d_{33} при комнатной температуре. Было установлено, что в диапазоне концентраций $x \approx 0,5$ наблюдаются выраженные немонотонные изменения, сопровождающиеся достижением максимального значения пьезомодуля d_{33} (540 пКл/Н). Также отмечено, что с ростом концентрации x происходит понижение температуры Кюри (T_c), что, предположительно, связано с уменьшением содержания сегнетоэлектрической (СЭ) компоненты PT в образцах.

Финансирование

Работа выполнялась при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания по созданию новых молодежных лабораторий (проект FSFZ-2023-0005, FSFZ-2025-0003), использовалось оборудование Центра коллективного пользования РТУ МИРЭА, получившего поддержку Минобрнауки РФ в рамках Соглашения от 01.09.2021 №075-15-2021-689.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Шкиндеров М.С., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.12.6>

Funding

The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of a state assignment to create new youth laboratories (project FSFZ-2023-0005, FSFZ-2025-0003), using equipment from the RTU MIREA Shared Use Centre, which received support from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under Agreement No. 075-15-2021-689 dated 01.09.2021.

Conflict of Interest

None declared.

Review

Shkinderov M.S., Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.12.6>

Список литературы / References

1. Stringer C.J. Dielectric Characteristics of Perovskite-Structured High-Temperature Relaxor Ferroelectrics: The $\text{BiScO}_3\text{--Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{--PbTiO}_3$ Ternary System / C.J. Stringer, N.J. Donnelly, T.R. Shrout [et al.] // J. Am. Ceram. Soc. — 2008. — Vol. 91, № 6. — P. 1781–1787. — DOI: 10.1111/j.1551-2916.2008.02298.x
2. Буш А.А. Диэлектрические и пьезоэлектрические свойства керамических образцов твердых растворов $(1-2x)\text{BiScO}_3\cdot x\text{PbTiO}_3\cdot x\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ ($0,30 \leq x \leq 0,46$) / А.А. Буш, К.Е. Каменцев, А.М. Лаврентьев [и др.] // Неорганические материалы. — 2011. — Т. 47, № 7. — С. 865–871. — DOI: 10.1134/S0020168511070065
3. Буш А.А. Сегнетоэлектрические-релаксорные свойства образцов системы $(1-2x)\text{BiScO}_3\cdot x\text{PbTiO}_3\cdot x\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ ($0,30 \leq x \leq 0,46$) / А.А. Буш, К.Е. Каменцев, М.А. Бехтин [и др.] // ФТТ. — 2017. — Т. 59, № 1. — С. 36–44. — DOI: 10.1134/S1063783417010036
4. Xie G. Structure and electrical properties of PMN–BS–PT piezoelectric ceramics / G. Xie // Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications. — Chengdu, Sichuan, 2017. — P. 537–540.

5. Talanov M.V. Structure-property relationships in $\text{BiScO}_3\text{-PbTiO}_3\text{-PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ ceramics near the morphotropic phase boundary / M.V. Talanov, A.A. Bush, K.E. Kamentsev [et al.] // *J. Am. Ceram. Soc.* — 2018. — Vol. 101, № 2. — P. 683–693. — DOI: 10.1111/jace.15225
6. Спицин А.И. Получение, структурные и электрофизические исследования сегнетокерамических образцов системы $(1-2x)\text{BiScO}_3\cdot x\text{PbTiO}_3\cdot x\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$, $0 \leq x \leq 0,50$ / А.И. Спицин, А.А. Буш, К.Е. Каменцев [и др.] // *Тонкие химические технологии.* — 2019. — Т. 14, № 3. — С. 78–89. — DOI: 10.32362/2410-6593-2019-14-3-78-89
7. Talanov M.V. Structure, dielectric and piezoelectric properties of the $\text{BiScO}_3\text{-PbTiO}_3\text{-PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ ceramics / M.V. Talanov, A.A. Bush, K.E. Kamentsev [et al.] // *Ferroelectrics.* — 2019. — Vol. 538, № 1. — P. 105–112. — DOI: 10.1080/00150193.2019.1569992
8. Dong Y. Review of $\text{BiScO}_3\text{-PbTiO}_3$ piezoelectric materials for high temperature applications: fundamental, progress, and perspective / Y. Dong, K. Zou, R. Liang [et al.] // *Prog. Mater. Sci.* — 2023. — Vol. 132. — P. 1027–1036. — DOI: 10.1016/j.pmatsci.2022.101026
9. Сысоев М.А. Получение, структурные и электрофизические исследования керамических образцов твердых растворов со структурой перовскита, образующихся в системе $(1-2x)\text{BiScO}_3\cdot(2-y)x\text{PbTiO}_3\cdot yx\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ / М.А. Сысоев, А.А. Буш, К.Е. Каменцев [и др.] // *Неорганические материалы.* — 2023. — Т. 59, № 12. — С. 1391–1401. — DOI: 10.31857/S0002337X23120084
10. Nogai A.A. Synthesis and study of structural and electrophysical characteristics of piezoceramic section $(1-x)(0,8\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3\cdot 0,2\text{BiScO}_3)\cdot x(0,8\text{PbTiO}_3\cdot 0,2\text{BiScO}_3)$ of the ternary system $\text{BiScO}_3\text{-PbTiO}_3\text{-PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ / A.A. Nogai, M.A. Sysoev, A.A. Bush [et al.] // *J. Advanced Dielectrics.* — 2025. — Vol. 18, № 1. — DOI: 10.1142/S2010135X24500115
11. Noheda B. Phase Diagram of the Ferroelectric Relaxor $(1-x)\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3\text{-xPbTiO}_3$ / B. Noheda, D.E. Cox, G. Shirane [et al.] // *Phys. Rev. B.* — 2002. — Vol. 66. — DOI: 10.1103/PhysRevB.66.054104
12. Eitel R. Phase Diagram of the Perovskite System $(1-x)\text{BiScO}_3\text{-xPbTiO}_3$ / R. Eitel, S. Zhang, T. Shrout [et al.] // *J. Appl. Phys.* — 2004. — Vol. 96. — P. 2828–2831. — DOI: 10.1063/1.1777810
13. Chaigneau J. Morphotropic Phase Boundaries in $(\text{BiScO}_3)_{1-x}(\text{PbTiO}_3)_x$ ($0,60 < x < 0,75$) and Their Relation to Chemical Composition and Polar Order / J. Chaigneau, J.M. Kiat, C. Malibert [et al.] // *Phys. Rev. B.* — 2007. — Vol. 76. — DOI: 10.1103/PhysRevB.76.094111
14. Inaguma Y. High-Pressure Synthesis and Ferroelectric Properties in Perovskite-Type $\text{BiScO}_3\text{-PbTiO}_3$ Solid Solution / Y. Inaguma, A. Miyaguchi, M. Yoshida [et al.] // *J. Appl. Phys.* — 2004. — Vol. 95, № 1. — P. 231–235. — DOI: 10.1063/1.1629394
15. Noheda B. Structure and high-piezoelectricity in lead oxide solid solutions / B. Noheda // *Current Opinion in Solid State and Materials Science.* — 2002. — Vol. 6. — P. 27–34. — DOI: 10.1016/S1359-0286(02)00015-3
16. Guo R. Morphotropic Phase Boundary Perovskites, High Strain Piezoelectrics, and Dielectric Ceramics / R. Guo, K.M. Nair, W. Wong-Ng [et al.]. — Wiley-American Ceramic Society, 2003. — 600 p.
17. Cordero F. Elastic Properties and Enhanced Piezoelectric Response at Morphotropic Phase Boundaries / F. Cordero // *Materials.* — 2015. — Vol. 8. — P. 8195–8245. — DOI: 10.3390/ma8125452
18. Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides / R.D. Shannon // *Acta Cryst.* — 1976. — Vol. A32. — P. 751–767. — DOI: 10.1107/S0567739476001551
19. Сиротинкин В.П. Структура сегнетоэлектрика-релаксора $(1-2x)\text{BiScO}_3\cdot x\text{PbTiO}_3\cdot x\text{PbMg}_{0,33}\text{Nb}_{0,67}\text{O}_3$, $x=0,42$ в поляризованном и деполаризованном состоянии / В.П. Сиротинкин, А.А. Буш, А.И. Спицин [и др.] // *Кристаллография.* — 2018. — Т. 63, № 1. — С. 93–98. — DOI: 10.7868/S0023476118010162
20. Сиротинкин В.П. Применение профильного анализа дифракционных пиков для определения фазовых соотношений в системе $(1-2x)\text{BiScO}_3\cdot x\text{PbTiO}_3\cdot x\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ вблизи морфотропной границы / В.П. Сиротинкин, А.А. Буш, А.И. Спицин [и др.] // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* — 2019. — Т. 85, № 4. — С. 22–27. — DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-4-22-27
21. Sirotnikin V.P. The Application of the Profile Analysis of Diffraction Peaks for Determination of the Phase Relationships in the $(1-2x)\text{BiScO}_3\cdot x\text{PbTiO}_3\cdot x\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ System near the Morphotropic Phase Boundary / V.P. Sirotnikin, A.A. Bush, A.I. Spitsin [et al.] // *Inorg. Mater.* — 2020. — Vol. 56, № 15. — P. 1462–1466. — DOI: 10.1134/S0020168520150170
22. Sirotnikin V. Phase structure of the ceramic samples of the $\text{BiScO}_3\text{-PbTiO}_3\text{-PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ system near the morphotropic phase boundary studied by the Rietveld method / V. Sirotnikin, A. Bush, M. Sysoev // *Zeitschrift fur Kristallographie.* — 2024. — Vol. 239, № 5–6. — P. 167–176. — DOI: 10.1515/zkri-2024-0065
23. Kang B.S. Diffuse dielectric anomaly in perovskite-type ferroelectric oxides in the temperature range of 400–700°C / B.S. Kang, S.K. Choi, C.H. Park // *J. Appl. Phys.* — 2003. — Vol. 84, № 3. — P. 1904–1911. — DOI: 10.1063/1.1589595
24. Bokov A. Recent progress in relaxor ferroelectrics with perovskite structure / A. Bokov, Z.-G. Ye // *J. Mater. Sci.* — 2006. — Vol. 41. — P. 31–52. — DOI: 10.1007/s10853-005-5915-7
25. Maiti T. Structure-property phase diagram of $\text{BaZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ system / T. Maiti, R. Guo, A.S. Bhalla // *J. Am. Ceram. Soc.* — 2008. — Vol. 91. — P. 1769–1780. — DOI: 10.1111/j.1551-2916.2008.02442.x
26. Zhao X. Influence of cation order on the electric field-induced phase transition in $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ -based relaxor ferroelectrics / X. Zhao, W. Qu, H. He [et al.] // *J. Am. Ceram. Soc.* — 2006. — Vol. 89. — P. 202–209. — DOI: 10.1111/J.1551-2916.2005.00675.X
27. Fedulov D. Preparation, X-ray phase analysis and dielectric properties of samples of the $\text{Pb}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$ and $\text{Pb}(\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y)_{1/2}\text{W}_{1/2}\text{O}_3$ ($0 \leq x, y \leq 1$) systems / D. Fedulov, V. Kozlov, A. Bush [et al.] // *Ceram. Int.* — 2022. — Vol. 48. — P. 33219–33228. — DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.07.264

28. Kozlov V.I. Phase diagram of polar states in $\text{BaTiO}_3 - \text{BaSnO}_3 - \text{PbTiO}_3$ system / V.I. Kozlov, F.F. Bush, M.V. Talanov // *Materials Research Bulletin*. — 2025. — Vol. 189. — DOI: 10.1016/j.materresbull.2025.113446

Список литературы на английском языке / References in English

1. Stringer C.J. Dielectric Characteristics of Perovskite-Structured High-Temperature Relaxor Ferroelectrics: The $\text{BiScO}_3\text{-Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ Ternary System / C.J. Stringer, N.J. Donnelly, T.R. Shrout [et al.] // *J. Am. Ceram. Soc.* — 2008. — Vol. 91, № 6. — P. 1781–1787. — DOI: 10.1111/j.1551-2916.2008.02298.x
2. Bush A.A. Dielektricheskie i p'ezoelektricheskie svoistva keramicheskikh obraztsov tverdykh rastvorov $(1-2x)\text{BiScO}_3\cdot x\text{PbTiO}_3\cdot x\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ ($0.30 \leq x \leq 0.46$) [Dielectric and piezoelectric properties of ceramic samples of solid solutions $(1-2x)\text{BiScO}_3\cdot x\text{PbTiO}_3\cdot x\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ ($0.30 \leq x \leq 0.46$)] / A.A. Bush, K.E. Kamensev, A.M. Lavrent'ev [et al.] // *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials]. — 2011. — Vol. 47, № 7. — P. 865–871. — DOI: 10.1134/S0020168511070065 [in Russian]
3. Bush A.A. Segnetoelektricheskie-relaksornye svoistva obraztsov sistemy $(1-2x)\text{BiScO}_3\cdot x\text{PbTiO}_3\cdot x\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ ($0.30 \leq x \leq 0.46$) [Ferroelectric-relaxor properties of samples of the system $(1-2x)\text{BiScO}_3\cdot x\text{PbTiO}_3\cdot x\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ ($0.30 \leq x \leq 0.46$)] / A.A. Bush, K.E. Kamensev, M.A. Bekhtin [et al.] // *FTT* [Physics of the Solid State]. — 2017. — Vol. 59, № 1. — P. 36–44. — DOI: 10.1134/S1063783417010036 [in Russian]
4. Xie G. Structure and electrical properties of PMN–BS–PT piezoelectric ceramics / G. Xie // *Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications*. — Chengdu, Sichuan, 2017. — P. 537–540.
5. Talanov M.V. Structure-property relationships in $\text{BiScO}_3\text{-PbTiO}_3\text{-PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ ceramics near the morphotropic phase boundary / M.V. Talanov, A.A. Bush, K.E. Kamensev [et al.] // *J. Am. Ceram. Soc.* — 2018. — Vol. 101, № 2. — P. 683–693. — DOI: 10.1111/jace.15225
6. Spitsyn A.I. Poluchenie, strukturnye i elektrofizicheskie issledovaniya segnetokeramicheskikh obraztsov sistemy $(1-2x)\text{BiScO}_3\cdot x\text{PbTiO}_3\cdot x\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$, $0 \leq x \leq 0.50$ [Preparation, structural and electrophysical studies of ferroelectric ceramic samples of the system $(1-2x)\text{BiScO}_3\cdot x\text{PbTiO}_3\cdot x\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$, $0 \leq x \leq 0.50$] / A.I. Spitsyn, A.A. Bush, K.E. Kamensev [et al.] // *Tonkie khimicheskie tekhnologii* [Fine Chemical Technologies]. — 2019. — Vol. 14, № 3. — P. 78–89. — DOI: 10.32362/2410-6593-2019-14-3-78-89 [in Russian]
7. Talanov M.V. Structure, dielectric and piezoelectric properties of the $\text{BiScO}_3\text{-PbTiO}_3\text{-PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ ceramics / M.V. Talanov, A.A. Bush, K.E. Kamensev [et al.] // *Ferroelectrics*. — 2019. — Vol. 538, № 1. — P. 105–112. — DOI: 10.1080/00150193.2019.1569992
8. Dong Y. Review of $\text{BiScO}_3\text{-PbTiO}_3$ piezoelectric materials for high temperature applications: fundamental, progress, and perspective / Y. Dong, K. Zou, R. Liang [et al.] // *Prog. Mater. Sci.* — 2023. — Vol. 132. — P. 1027–1036. — DOI: 10.1016/j.pmatsci.2022.101026
9. Sysoev M.A. Poluchenie, strukturnye i elektrofizicheskie issledovaniya keramicheskikh obraztsov tverdykh rastvorov so strukturoy perovskita, obrazuyushchikhsya v sisteme $(1-2x)\text{BiScO}_3\cdot (2-y)\text{xPbTiO}_3\cdot y\text{xPbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ [Preparation, structural and electrophysical studies of ceramic solid solution samples with perovskite structure formed in the system $(1-2x)\text{BiScO}_3\cdot (2-y)\text{xPbTiO}_3\cdot y\text{xPbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$] / M.A. Sysoev, A.A. Bush, K.E. Kamensev [et al.] // *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials]. — 2023. — Vol. 59, № 12. — P. 1391–1401. — DOI: 10.31857/S0002337X23120084 [in Russian]
10. Nogai A.A. Synthesis and study of structural and electrophysical characteristics of piezoceramic section $(1-x)(0.8\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3, 0.2\text{BiScO}_3)\cdot x(0.8\text{PbTiO}_3, 0.2\text{BiScO}_3)$ of the ternary system $\text{BiScO}_3 - \text{PbTiO}_3 - \text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ / A.A. Nogai, M.A. Sysoev, A.A. Bush [et al.] // *J. Advanced Dielectrics*. — 2025. — Vol. 18, № 1. — DOI: 10.1142/S2010135X24500115
11. Noheda B. Phase Diagram of the Ferroelectric Relaxor $(1-x)\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3\text{-xPbTiO}_3$ / B. Noheda, D.E. Cox, G. Shirane [et al.] // *Phys. Rev. B*. — 2002. — Vol. 66. — DOI: 10.1103/PhysRevB.66.054104
12. Eitel R. Phase Diagram of the Perovskite System $(1-x)\text{BiScO}_3\text{-xPbTiO}_3$ / R. Eitel, S. Zhang, T. Shrout [et al.] // *J. Appl. Phys.* — 2004. — Vol. 96. — P. 2828–2831. — DOI: 10.1063/1.1777810
13. Chaigneau J. Morphotropic Phase Boundaries in $(\text{BiScO}_3)_{1-x}(\text{PbTiO}_3)_x$ ($0.60 < x < 0.75$) and Their Relation to Chemical Composition and Polar Order / J. Chaigneau, J.M. Kiat, C. Malibert [et al.] // *Phys. Rev. B*. — 2007. — Vol. 76. — DOI: 10.1103/PhysRevB.76.094111
14. Inaguma Y. High-Pressure Synthesis and Ferroelectric Properties in Perovskite-Type $\text{BiScO}_3\text{-PbTiO}_3$ Solid Solution / Y. Inaguma, A. Miyaguchi, M. Yoshida [et al.] // *J. Appl. Phys.* — 2004. — Vol. 95, № 1. — P. 231–235. — DOI: 10.1063/1.1629394
15. Noheda B. Structure and high-piezoelectricity in lead oxide solid solutions / B. Noheda // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. — 2002. — Vol. 6. — P. 27–34. — DOI: 10.1016/S1359-0286(02)00015-3
16. Guo R. Morphotropic Phase Boundary Perovskites, High Strain Piezoelectrics, and Dielectric Ceramics / R. Guo, K.M. Nair, W. Wong-Ng [et al.]. — Wiley-American Ceramic Society, 2003. — 600 p.
17. Cordero F. Elastic Properties and Enhanced Piezoelectric Response at Morphotropic Phase Boundaries / F. Cordero // *Materials*. — 2015. — Vol. 8. — P. 8195–8245. — DOI: 10.3390/ma8125452
18. Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides / R.D. Shannon // *Acta Cryst.* — 1976. — Vol. A32. — P. 751–767. — DOI: 10.1107/S0567739476001551
19. Sirotinkin V.P. Struktura segnetoelektrika-relaksora $(1-2x)\text{BiScO}_3\cdot x\text{PbTiO}_3\cdot x\text{PbMg}_{0.33}\text{Nb}_{0.67}\text{O}_3$, $x=0.42$ v polarizovannom i depolarizovannom sostoyanii [Structure of the ferroelectric-relaxor $(1-2x)\text{BiScO}_3\cdot x\text{PbTiO}_3\cdot x\text{PbMg}_{0.33}\text{Nb}_{0.67}\text{O}_3$, $x=0.42$ in polarized and depolarized states] / V.P. Sirotinkin, A.A. Bush, A.I. Spitsyn [et al.] // *Kristallografiya* [Crystallography]. — 2018. — Vol. 63, № 1. — P. 93–98. — DOI: 10.7868/S0023476118010162 [in Russian]

20. Sirotnikin V.P. Primenenie profil'nogo analiza diffraktsionnykh pikov dlya opredeleniya fazovykh sootnoshenii v sisteme $(1-2x)\text{BiScO}_3 \cdot x\text{PbTiO}_3 \cdot x\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ vblizi morfotropnoi granitsy [Application of profile analysis of diffraction peaks to determine phase relations in the system $(1-2x)\text{BiScO}_3 \cdot x\text{PbTiO}_3 \cdot x\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ near the morphotropic boundary] / V.P. Sirotnikin, A.A. Bush, A.I. Spitsyn [et al.] // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials]. — 2019. — Vol. 85, № 4. — P. 22–27. — DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-4-22-27 [in Russian]
21. Sirotnikin V.P. The Application of the Profile Analysis of Diffraction Peaks for Determination of the Phase Relationships in the $(1-2x)\text{BiScO}_3 \cdot x\text{PbTiO}_3 \cdot x\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ System near the Morphotropic Phase Boundary / V.P. Sirotnikin, A.A. Bush, A.I. Spitsyn [et al.] // Inorg. Mater. — 2020. — Vol. 56, № 15. — P. 1462–1466. — DOI: 10.1134/S0020168520150170
22. Sirotnikin V. Phase structure of the ceramic samples of the $\text{BiScO}_3 - \text{PbTiO}_3 - \text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ system near the morphotropic phase boundary studied by the Rietveld method / V. Sirotnikin, A. Bush, M. Sysoev // Zeitschrift fur Kristallographie. — 2024. — Vol. 239, № 5–6. — P. 167–176. — DOI: 10.1515/zkri-2024-0065
23. Kang B.S. Diffuse dielectric anomaly in perovskite-type ferroelectric oxides in the temperature range of 400–700°C / B.S. Kang, S.K. Choi, C.H. Park // J. Appl. Phys. — 2003. — Vol. 84, № 3. — P. 1904–1911. — DOI: 10.1063/1.1589595
24. Bokov A. Recent progress in relaxor ferroelectrics with perovskite structure / A. Bokov, Z.-G. Ye // J. Mater. Sci. — 2006. — Vol. 41. — P. 31–52. — DOI: 10.1007/s10853-005-5915-7
25. Maiti T. Structure-property phase diagram of $\text{BaZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ system / T. Maiti, R. Guo, A.S. Bhalla // J. Am. Ceram. Soc. — 2008. — Vol. 91. — P. 1769–1780. — DOI: 10.1111/j.1551-2916.2008.02442.x
26. Zhao X. Influence of cation order on the electric field-induced phase transition in $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ -based relaxor ferroelectrics / X. Zhao, W. Qu, H. He [et al.] // J. Am. Ceram. Soc. — 2006. — Vol. 89. — P. 202–209. — DOI: 10.1111/J.1551-2916.2005.00675.X
27. Fedulov D. Preparation, X-ray phase analysis and dielectric properties of samples of the $\text{Pb}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$ and $\text{Pb}(\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y)_{1/2}\text{W}_{1/2}\text{O}_3$ ($0 \leq x, y \leq 1$) systems / D. Fedulov, V. Kozlov, A. Bush [et al.] // Ceram. Int. — 2022. — Vol. 48. — P. 33219–33228. — DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.07.264
28. Kozlov V.I. Phase diagram of polar states in $\text{BaTiO}_3 - \text{BaSnO}_3 - \text{PbTiO}_3$ system / V.I. Kozlov, F.F. Bush, M.V. Talanov // Materials Research Bulletin. — 2025. — Vol. 189. — DOI: 10.1016/j.materresbull.2025.113446