

УДК 54–31 + 537.31/.32 + 537.226 + 666.654

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ЛАНТАНЗАМЕЩЕННОГО ТИТАНАТА ВИСМУТА СО СТРУКТУРОЙ ФАЗЫ АУРИВИЛЛИУСА

© Канд. хим. наук А.И. Клындюк, канд. хим. наук А.А. Глинская, канд. хим. наук Е.А. Чижова, докт. хим. наук Л.А. Башкиров

УО «Белорусский государственный технологический университет (БГТУ), г. Минск, Республика Беларусь

Твердофазным методом синтезированы твердые растворы $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ($x = 0,05; 0,10; 0,15$), изучены их кристаллическая структура и физико-химические свойства. Установлено, что частичное замещение висмута лантаном в слоистом титанате висмута $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ приводит к незначительному увеличению размеров элементарной ячейки образующихся при этом твердых растворов, снижению их температуры Кюри, диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь, а также энергозатрат при электропереносе, и слабо сказывается на величине их электропроводности, термо-ЭДС и коэффициента линейного теплового расширения. Найдено, что в исследованной серии твердый раствор состава $\text{Bi}_{3,95}\text{La}_{0,05}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ характеризуется аномально низкими значениями электропроводности, диэлектрических свойств и коэффициента линейного теплового расширения.

Ключевые слова: слоистый титанат висмута, диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери, электропроводность, термо-ЭДС, тепловое расширение.

The $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ($x = 0,05; 0,10; 0,15$) solid solutions were synthesized using solid-state reactions method, their crystal structure and physico-chemical properties were studied. It has been established that the partial substitution of bismuth by lanthanum in layered $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ bismuth titanate results in an insignificant increase in the dimensions of the unit cell of the solid solutions formed, the decrease in their Curie temperature, the dielectric constant and dielectric losses, and the energy consumption in the electrotransport, and slightly affects the values of their electrical conductivity, thermo-EMF and linear thermal expansion coefficient. It was found that in the investigated series the solid solution of $\text{Bi}_{3,95}\text{La}_{0,05}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ composition is characterized by anomalously low values of electrical conductivity, dielectric properties and linear thermal expansion coefficient.

Keywords: layered bismuth titanate, dielectric permittivity, dielectric losses, electrical conductivity, thermo-EMF, thermal expansion.

Введение

Титанат висмута $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ относится к семейству фаз Ауривиллиуса $\text{Bi}_2\text{A}_{n-1}\text{B}_n\text{O}_{3n+3}$, структура которых состоит из чередующихся флюоритоподобных слоев $[\text{Bi}_2\text{O}_2]^{2+}$ и перовскитоподобных блоков $[\text{A}_{n-1}\text{B}_n\text{O}_{3n+1}]^{2-}$, где n – число октаэдрических слоев в перовскитоподобном блоке [1, 2]. Соединение $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ является трехслойной ($n = 3$) фазой Ауривиллиуса и представляет собой сегнетоэлектрик с высокой температурой Кюри ($T_C = 948$ K) [3]. Способность сохранять сегнетоэлектрические свойства в широком интервале температур позволяет рассматривать слоистый титанат висмута как перспективный материал для радио-, акусто-

и оптоэлектроники, пригодный для изготовления оптических дисплеев, пьезоэлектрических преобразователей, фильтров, радиотехнических конденсаторов, а также запоминающих устройств различных типов. Так, например, в качестве материала для энергонезависимых запоминающих устройств рассматривается лантанзамещенный титанат висмута $\text{Bi}_{3,25}\text{La}_{0,75}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, который по ряду функциональных характеристик превосходит такие традиционный сегнетоэлектрики, как титанат–цирконат свинца $\text{PbTi}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_3$ или танталат висмута–стронция $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ [4].

Исследованию кристаллической структуры, физико-химических и функциональных свойств твердых растворов $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$



Клындюк А.И.
доцент



Глинская А.А.
старший преподаватель



Чижова Е.А.
доцент



Башкиров Л.А.
профессор

посвящен ряд работ [1, 4–6]. Авторами [5] было найдено, что частичное замещение висмута лантаном в $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ приводит к уменьшению степени орторомбического искажения образующихся при этом твердых растворов при $x \leq 1,0$, а при $x > 1,0$ твердые растворы $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ имеют тетрагональную структуру и являются параэлектриками. При этом, согласно результатам [1, 5], при $x \leq 0,75$ ионы La^{3+} замещают ионы Bi^{3+} в перовскитоподобных блоках $[\text{Bi}_2\text{Ti}_3\text{O}_{10}]^{2-}$, а при $x > 0,75$ могут замещать также ионы Bi^{3+} в флюоритоподобных слоях $[\text{Bi}_2\text{O}_2]^{2+}$, вследствие чего формулы твердых растворов $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ при $x \leq 0,75$ и $x > 0,75$ следует записывать как $[\text{Bi}_2\text{O}_2][\text{Bi}_{2-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{10}]$ и $[\text{Bi}_{2-y}\text{La}_y\text{O}_2] \times \times [\text{Bi}_{2-x+y}\text{La}_{x-y}\text{Ti}_3\text{O}_{10}]$ соответственно. В работе [6] установлено, что частичное замещение висмута лантаном или церием в $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ приводит к снижению температуры Кюри керамики (так, T_C образцов состава $\text{Bi}_{3,5}\text{La}_{0,5}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ и $\text{Bi}_{3,5}\text{Ce}_{0,5}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ на 150 и 135 К, соответственно, ниже, чем для базовой фазы $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$), при этом добавка оксида лантана улучшает диэлектрические свойства слоистого титаната висмута, что авторы связывают с уменьшением концентрации кислородных вакансий в керамике вследствие снижения летучести висмута.

В данной работе представлены результаты исследования кристаллической структуры, теплового расширения, электрических и диэлектрических свойств керамических образцов лантанзамещенного слоистого титаната висмута $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ с небольшим содержанием оксида лантана ($x \leq 3,75$ мол. %).

Экспериментальная часть

Порошки состава $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ($x = 0,00; 0,05; 0,10; 0,15$) получали керамическим методом из Bi_2O_3 , La_2O_3 и TiO_2 квалификации «х.ч.», взятых в соответствующих стехиометрических соотношениях. Исходную шихту подвергали помолу с добавлением этанола в планетарной мельнице «Pulverizette 6» (350 об/мин, 30 мин), после чего просушивали на воздухе для удаления этанола и прессовали с добавлением этанола под давлением 50–75 МПа в таблетки диаметром 25 мм и высотой 5–7 мм, которые отжигали при температуре 923 К

на воздухе в течение 6 ч для перевода Bi_2O_3 из исходной α -формы в более активную δ -форму [7]. После предварительного отжига повторяли операции помола и прессования, после чего образцы отжигали на воздухе при температуре 1023 К в течение 6 ч для предотвращения плавления Bi_2O_3 [7]. Далее вновь повторяли операции помола и прессования, при котором образцы под давлением 110–130 МПа формировали в виде прямоугольных параллелепипедов размером $5 \times 5 \times 30$ мм, а затем отжигали при температуре 1223 К на воздухе в течение 5 ч. Для измерения электропроводности и диэлектрических свойств из спеченной керамики вырезали образцы в форме прямоугольных параллелепипедов размером $4 \times 4 \times 2$ мм.

Идентификацию образцов и определение параметров их кристаллической структуры осуществляли при помощи рентгенофазового анализа (РФА) (дифрактометр Bruker D8 XRD Advance, $\text{CuK}\alpha$ -излучение) и ИК-спектроскопии поглощения (Фурье-спектрометр Nexus фирмы Thermo Nicolet). На основании результатов РФА рассчитывали рентгенографическую плотность твердых растворов $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ($\rho_{\text{рент}}$). Кажущуюся плотность образцов ($\rho_{\text{эксп}}$) находили по их массе и геометрическим размерам. Тепловое расширение, электропроводность (σ) (на постоянном и переменном ($\nu = 1$ кГц) токе), коэффициент термо-ЭДС (S) и диэлектрические свойства (ϵ , $\text{tg}\delta$) образцов исследовали на воздухе в интервале температур 300–1100 К по методикам, описанным в [8–10]. Значения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР, α), энергии активации электропроводности на постоянном (E_A) и переменном токе (E_a) и термо-ЭДС (E_S) образцов определяли по линейным участкам зависимостей $\Delta l/l_0 = f(T)$, $\ln(\sigma T) = f(1/T)$ и $S = f(1/T)$ соответственно.

Результаты и их обсуждение

После заключительной стадии синтеза образцы $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ были, в пределах погрешности РФА, однофазными, а их структура соответствовала структуре слоистого титаната висмута $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (рис. 1 а). Значения параметров кристаллической структуры образцов, рассчитанные в рамках пр. гр. симм. $B2cb$ [11], представлены

в табл. 1. Как видно, частичное замещение висмута лантаном в $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ приводит к незначительному увеличению параметров элементарной ячейки твердых растворов; степень орторомбического искажения $((a-b)/a)$ элементарной ячейки несколько увеличивается (от $1,66 \cdot 10^{-3}$ для $x = 0$ до $2,94 \cdot 10^{-3}$ для $x = 0,15$), а степень тетрагонального искажения $(c/(a \cdot b)^{0,5})$ практически не изменяется и составляет 6,04–6,05. Следует отметить, что параметры кристаллической структуры базового титаната висмута, найденные нами (табл. 1), хорошо согласуются с литературными данными, согласно которым для $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ параметры a , b и c составляют 5,429, 5,395 и 32,167 Å [11], 5,444, 5,407 и 32,808 Å [12], 5,4403, 5,4175 и 32,7862 Å [12, 13] соответственно.

На ИК-спектрах поглощения порошков $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ наблюдается ряд полос поглощения с экстремумами при 813–814 cm^{-1} (ν_1), 584–586 cm^{-1} (ν_2), 469–475 cm^{-1} (ν_3), 372–376 cm^{-1} (ν_4) и 322–328 cm^{-1} (ν_5) (рис. 1 б), отвечающих, согласно [11], валентным (ν_1 и ν_2) и деформационным (ν_3 , ν_4 и ν_5) колебаниям связей $\text{Bi}-\text{O}$ (ν_1 и ν_3) и $\text{Ti}-\text{O}$ (ν_2 , ν_4 и ν_5) в структуре этих сложных оксидов. Как видно, положения экстремумов полос поглощения практически не изменяются с ростом x , из чего следует, что частичное изовалентное замещение ионов Bi^{3+} ионами La^{3+} в слоистом титанате висмута $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ практически не оказывает влияния на величину энергии металл-кислородных взаимодействий в структуре образующихся при этом твердых растворов $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$.

Значения кажущейся плотности спеченной керамики состава $\text{Bi}_{3,95}\text{La}_{0,05}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ и $\text{Bi}_{3,90}\text{La}_{0,10}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ были несколько ниже, а образца $\text{Bi}_{3,85}\text{La}_{0,15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ – близки к плотности базовой фазы $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (табл. 2), на основании чего можно заключить, что частичное замещение висмута лантаном в слоистом титанате висмута на его спекаемость положительного влияния не оказывает.

На температурных зависимостях относительного удлинения $(\Delta l/l_0 = f(T))$ для исследованной керамики не было обнаружено выраженных аномалий в области фазового перехода «сегнетоэлектрик–параэлектрик», сопровождающегося повышением симметрии (переход от орторомбической

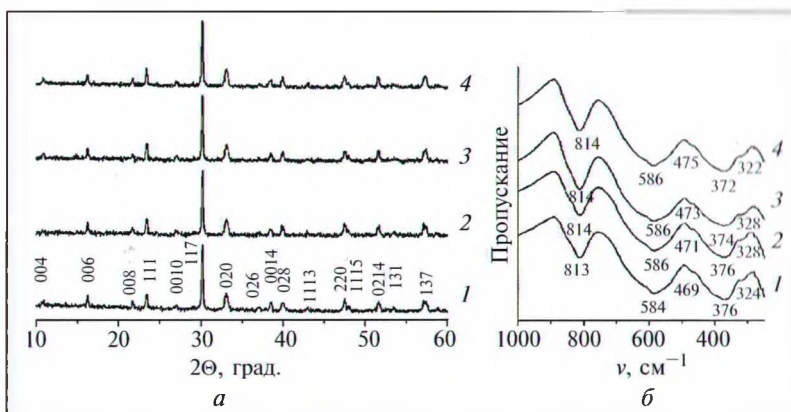


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы (а) и ИК-спектры поглощения (б) порошков $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$: $x = 0,00$ (1), 0,05 (2), 0,10 (3), 0,15 (4)

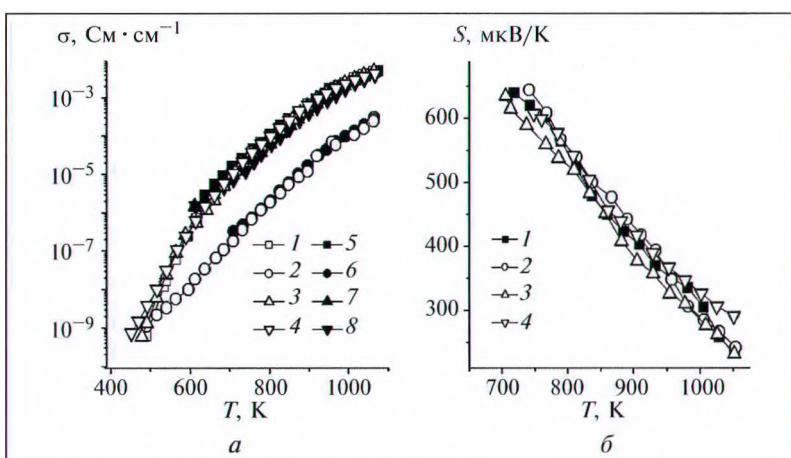


Рис. 2. Температурные зависимости электропроводности (а) на постоянном (1–4) и переменном токе (5–8) и коэффициента термо-ЭДС (б) спеченной керамики состава $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$: $x = 0,00$ (1, 5), 0,05 (2, 6), 0,10 (3, 7), 0,15 (4, 8)

Таблица 1. Параметры кристаллической структуры твердых растворов $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$

x	$a, \text{Å}$	$b, \text{Å}$	$c, \text{Å}$	$V, \text{Å}^3$	$\rho_{\text{рентг}} \text{ г/см}^3$
0,00	5,421(8)	5,412(5)	32,70(3)	959,4(32)	8,12
0,05	5,426(9)	5,407(5)	32,78(3)	961,7(34)	8,07
0,10	5,424(8)	5,414(5)	32,78(3)	962,5(32)	8,04
0,15	5,433(9)	5,417(6)	32,79(3)	965,1(36)	8,00

Таблица 2. Значения кажущейся плотности ($\rho_{\text{эксп}}$), температурного коэффициента линейного расширения (α), энергии активации электропроводности (E_A, E_B) и термо-ЭДС (E_S) керамики $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$

x	$\rho_{\text{эксп}}, \text{ г/см}^3$	$\alpha \cdot 10^6, \text{ K}^{-1}$	$E_A, \text{ эВ}$	$E_B, \text{ эВ}$	$E_S, \text{ эВ}$
0,00	7,07	10,2(2)	1,277(12)	1,066(17)	0,932(26)
0,05	6,81	7,74(8)	1,266(26)	1,320(34)	1,023(27)
0,10	6,74	11,0(2)	1,247(07)	1,174(21)	0,864(23)
0,15	7,05	10,4(1)	1,166(10)	1,209(19)	0,864(15)

сингонии при $T < T_C$ к тетрагональной при $T > T_C$) [5], а значения среднего температурного коэффициента линейного расширения образцов несколько увеличивались с ростом x , за исключением состава $\text{Bi}_{3,95}\text{La}_{0,05}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, величина ТКЛР которого была аномально низка (табл. 2).

Как видно из данных, представленных на рис. 2, соединения $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ являются полупроводниками p -типа, что согласуется с литературными данными, согласно которым проводимость слоистого титаната висмута и его производных увеличивается с ростом температуры [7, 13], а коэффициент Зеебека фазы $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ при повышенных температурах положителен ($S > 0$) [14]. Значения электропроводности керамики, измеренные по постоянному и переменному ($\nu = 1$ кГц) токе, были практически идентичны (рис. 2 а), а величина коэффициента термо-ЭДС и удельной электропроводности твердых растворов $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ практически не зависела от x (за исключением состава $\text{Bi}_{3,95}\text{La}_{0,05}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, значения электрической проводимости которого были аномально низкими для исследованной серии образцов); таким образом, результаты исследования электрических свойств керамики $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ указывают на то, что частичное изовалентное замещение ионов Bi^{3+} ионами La^{3+} в слоистом титанате висмута практически не влияет на концентрацию и подвижность основных носителей заряда — «дырок» — в этом материале.

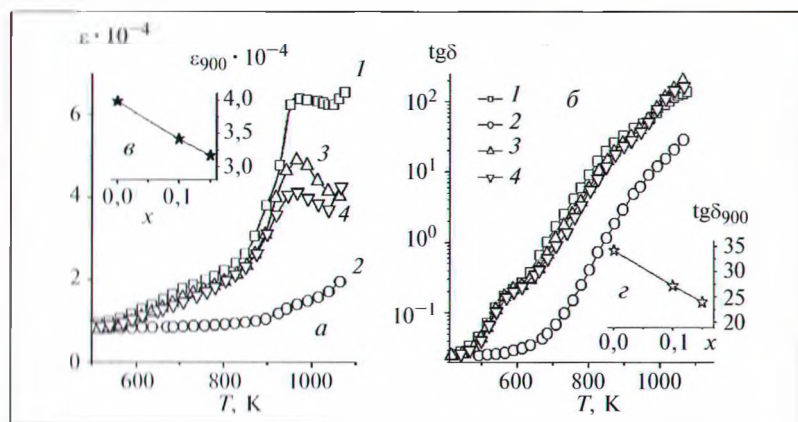
Значения энергии активации электропроводности и термо-ЭДС керамики были близки и составляли 1,1—1,3 эВ и 0,9—1,0 эВ соответственно (табл. 2), из чего следует, что частичное замещение висмута лантаном в $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ не оказывает существенного

влияния на величину энергозатрат при электропереносе в керамике $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$; найденные нами величины энергии активации электропроводности керамики лантанзамещенного титаната висмута хорошо согласуются с результатами работы [14], согласно которым величина энергии активации электропроводности поликристаллического $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ составляет 1,0 эВ (найденно по зависимости $\ln \sigma = f(T)$).

На температурных зависимостях диэлектрической проницаемости для исследованных образцов наблюдался резкий (для состава $\text{Bi}_{3,95}\text{La}_{0,05}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ — слабо выраженный) максимум (рис. 3 а), отвечающий фазовому превращению «сегнетоэлектрик—параэлектрик», температура которого составила 972,5, 967,3, 965,3 и 967,3 К для $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, $\text{Bi}_{3,95}\text{La}_{0,05}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, $\text{Bi}_{3,90}\text{La}_{0,10}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ и $\text{Bi}_{3,85}\text{La}_{0,15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ соответственно. Снижение температуры Кюри слоистого титаната висмута при частичном замещении в нем висмута лантаном, установленное нами, хорошо согласуется с результатами работ [6, 7], авторы которых обнаружили подобный эффект при исследовании твердых растворов $\text{Bi}_{3,5}\text{La}_{0,5}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, $\text{Bi}_{3,5}\text{Ce}_{0,5}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ [6] и $\text{Bi}_4\text{Ti}_3-x\text{Cr}_x\text{O}_{12}$ [7]. Величина диэлектрической проницаемости керамики $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ снижалась при увеличении содержания лантана в образцах (рис. 3 в), а для состава $\text{Bi}_{3,95}\text{La}_{0,05}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ была аномально низкой (рис. 3 а).

Диэлектрические потери керамики $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ увеличивались с ростом температуры и уменьшались при увеличении степени замещения висмута лантаном (рис. 3 в, г), при этом на зависимостях $\text{tg} \delta = f(T)$ для исследованных образцов наблюдались аномальные участки в области температур 570—620 К и 950—990 К. Вторая аномалия связана с переходом «сегнетоэлектрик—параэлектрик», а первая, очевидно, обусловлена наличием в образцах дефектов, таких, например, как вакансии висмута или кислорода [6]. Возрастание диэлектрических потерь исследованной керамики с ростом температуры коррелирует с возрастанием величины ее электрической проводимости, при этом наиболее низкими потерями характеризуется образец состава $\text{Bi}_{3,95}\text{La}_{0,05}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, имеющий наиболее низкую в исследованной серии электропроводность.

Рис. 3. Температурные (а, б) и концентрационные (в, г) зависимости диэлектрической проницаемости (а, в) и тангенса угла диэлектрических потерь (б, г) керамики $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$: $x = 0,00$ (1), 0,05 (2), 0,10 (3), 0,15 (4)



Заключение

При помощи керамического метода синтеза получены твердые растворы $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ($x = 0,05; 0,10; 0,15$), исследована их кристаллическая структура, изучены тепловое расширение, электропроводность, термо-ЭДС и диэлектрические свойства. Найдено, что замещение висмута лантаном в титанате висмута $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, являющемся трехслойной фазой Ауривиллиуса, приводит к небольшому возрастанию размеров элементарной ячейки твердых растворов $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, уменьшению их температуры Кюри, значительной диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь, а также снижению энергозатрат при электропереносе, и слабо влияет на величину их электрической проводимости, термо-ЭДС и коэффициента линейного теплового расширения. В исследованной серии твердых растворов состава $\text{Bi}_{3,95}\text{La}_{0,05}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ характеризуется аномально низкими значениями электропроводности, диэлектрической проницаемости, диэлектрических потерь и коэффициента линейного теплового расширения.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» (подпрограмма «Материаловедение и технологии материалов», задание 1.17).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hyatt N.C., Hriljac J.A., Comyn T.P. Cation disorder in $\text{Bi}_2\text{Ln}_2\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ Aurivillius phases (Ln = La, Pr, Nd and Sm) // *Mat. Res. Bull.* 2003. V. 38. P. 837–846.
2. Ломанова Н.А., Гусаров В.В. Импедансная спектроскопия поликристаллических материалов на основе фаз Ауривиллиуса системы $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ – BiFeO_3 // *Наносистемы: физика, химия, математика.* 2012. Т. 3. № 6. С. 112–122.
3. Scott J.F., Araujo C.A. Ferroelectric memories // *Science.* 1989. V. 246. P. 1400–1405.
4. Park B.H., Kang B.S., Bu S.D., Noh T.W., Lee J., Jo W. Lanthanum-substituted bismuth titanate for use in non-volatile memories // *Nature.* 1999. V. 401. P. 682–684.
5. Wu D., Yang B., Li A. Structural phase transition due to La substitution in $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ // *Phase Transitions.* 2009. V. 82. N. 2. P. 146–155.
6. Pavlović N., Koval V., Dusza J., Srdić V.V. Effect of Ce and La substitution on dielectric properties of bismuth titanate ceramics // *Ceram. Int.* 2011. V. 37. P. 487–492.
7. Королева М.С., Пиур И.В., Грасс В.Э., Бельый В.А., Королев Д.А., Чежина Н.В. Синтез и свойства хромсодержащих твердых растворов титаната висмута со структурой типа слоистого перовскита // *Изв. Коми научн. центра УрО РАН. Вып. 1 (9). Сыктывкар.* 2012. С. 24–28.
8. Клындюк А.И., Петров Г.С., Полуян А.Ф., Башкиров Л.А. Структура и физико-химические свойства твердых растворов $\text{Y}_2\text{Ba}_{1-x}\text{M}_x\text{CuO}_5$ (M—Sr, Ca) // *Неорган. матер.* 1999. Т. 35. № 5. С. 616–620.
9. Клындюк А.И., Чижова Е.А. Влияние замещения висмута неодимом и железа марганцем на диэлектрические свойства перовскитного феррита висмута // *Весті НАН Беларусі. Сер. хім. навук.* 2015. № 1. С. 7–11.
10. Клындюк А.И., Чижова Е.А. Структура, тепловое расширение и электрические свойства твердых растворов системы BiFeO_3 – NdMnO_3 // *Неорган. матер.* 2015. Т. 51. № 3. С. 272–277.
11. Chen Z., Yu Y., Hu J., Shui A., He X. Hydrothermal synthesis and characterization of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ powders // *J. Ceram. Soc. Jap.* 2009. V. 117. N. 3. P. 264–267.
12. Villegas M., Jardiel T., Caballero A.C., Fernandez J.F. Electrical Properties of Bismuth Titanate Based Ceramics with Secondary Phases // *J. Electroceram.* 2004. V. 13. P. 543–548.
13. Stojanovic B.D., Simoes A.Z., Paiva-Santos C.O., Quinelato C., Longo E., Varela J.A. Effect of processing route on the phase formation and properties of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ceramics // *Ceram. Int.* 2006. V. 32. P. 707–712.
14. Kim S.K., Miyayama M., Yanagida H. Electrical anisotropy and a plausible explanation for dielectric anomaly of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ single crystal // *Mat. Res. Bull.* 1996. V. 31. N. 1. P. 121–131.