

DOI: 10.17516/1998-2836-0228

УДК 541.122:538.214

Dielectric Properties $\text{Bi}_2\text{MgTaNbO}_9$

Nikolay A. Sekushin^a and Nadezhda A. Zhuk^{*b}

*^aInstitute of Chemistry of the Komi Science Center UB RAS
Syktyvkar, Russian Federation*

*^bSyktyvkar State University
Syktyvkar, Russian Federation*

Received 12.04.2021, received in revised form 11.05.2021, accepted 05.06.2021

Abstract. A phase-pure mixed oxide of the composition $\text{Bi}_2\text{MgNbTaO}_9$ with a pyrochlore structure was obtained by the ceramic synthesis method. The sample was characterized by the methods of X-ray phase and EDS analyzes, electron scanning microscopy. The electrical properties of samples of different thicknesses were investigated by impedance spectroscopy. The unit cell parameter is $a = 1.0544$ nm (sp. gr. $\text{Fd}3\text{m}$). As a result of modeling the impedance hodographs, an equivalent circuit is proposed that satisfactorily describes the electrical behavior of the sample. $\text{Bi}_2\text{MgNbTaO}_9$ is characterized by a high activation energy of 1.28 eV; moderately high dielectric constant $\sim 62\text{--}71$ and dielectric loss tangent ~ 0.003 at 1 MHz and 18 °C. No ionic transfer was detected. The investigated ceramics can be used to create multilayer ceramic capacitors.

Keywords: dielectric properties, impedance spectroscopy, pyrochlore.

Citation: Sekushin N.A., Zhuk N.A. Dielectric properties $\text{Bi}_2\text{MgTaNbO}_9$, J. Sib. Fed. Univ. Chem., 2021, 14(2), 197–206.
DOI: 10.17516/1998-2836-0228

Диэлектрические свойства $\text{Bi}_2\text{MgTaNbO}_9$

Н. А. Секушин^а, Н. А. Жук^б

^аИнститут химии Коми НЦ УрО РАН
Российская Федерация, Сыктывкар

^бСыктывкарский государственный университет
Российская Федерация, Сыктывкар

Аннотация. Керамическим методом синтеза получен фазово-чистый сложный оксид состава $\text{Bi}_2\text{MgNbTaO}_9$ со структурой пирохлора. Образец охарактеризован методами рентгенофазового и ЭДС анализов, электронной сканирующей микроскопии. Электрические свойства образцов разной толщины исследованы методом импеданс-спектроскопии. Параметр элементарной ячейки составляет $a=1.0544$ нм (пр. гр. Fd3m). В результате моделирования годографов импеданса предложена эквивалентная схема, удовлетворительно описывающая электрическое поведение образца. Для $\text{Bi}_2\text{MgNbTaO}_9$ характерна высокая энергия активации 1.28 эВ, умеренно высокая диэлектрическая проницаемость ~ 62 –71 и тангенс диэлектрических потерь ~ 0.003 при 1 МГц и 18 °С. Ионный перенос не обнаружен. Исследованная керамика может быть использована при создании многослойных керамических конденсаторов.

Ключевые слова: диэлектрические свойства, импеданс-спектроскопия, пирохлор.

Цитирование: Секушин, Н. А. Диэлектрические свойства $\text{Bi}_2\text{MgTaNbO}_9$ / Н. А. Секушин, Н. А. Жук // Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия, 2021, 14(2). С. 197–206. DOI: 10.17516/1998-2836-0228

Введение

Неиссякаемый на протяжении многих лет интерес к синтетическим пирохлорам обусловлен проявлением ими широкого спектра практически полезных свойств, таких как сверхпроводниковые, электрооптические, фотокаталитические и диэлектрические свойства [1, 2]. Висмутосодержащие пирохлоры привлекают пристальное внимание благодаря своим превосходным диэлектрическим свойствам – высокой диэлектрической проницаемости, малым значениям диэлектрических потерь и температурного коэффициента емкости, а также низкой температуре спекания и химической инертности по отношению к Ag-электродам. Сочетание превосходных практически значимых свойств пирохлоров делает их перспективными материалами для изготовления многослойных керамических конденсаторов, электронных устройств для СВЧ-диапазона [3-5].

Среди пирохлоров на основе висмута хорошие диэлектрические свойства проявляют сложные ниобаты висмута. Керамика $\text{Bi}_{2-x}\text{La}_x\text{Mg}_{2/3}\text{Nb}_{4/3}\text{O}_7$ ($x=0.25$) проявляет сравнительно большие диэлектрическую проницаемость 141 и тангенс диэлектрических потерь 0.1 [4]. Высокую диэлектрическую проницаемость 167-204 и низкие диэлектрические потери $\sim 10^{-4}$ - 10^{-3} (1 МГц, 28 °С) продемонстрировала керамика $\text{Bi}_{3+(5/2)x}\text{Mg}_{2-x}\text{Nb}_{3-(3/2)x}\text{O}_{14-x}$ ($0.14 \leq x \leq 0.22$) [6]. Для образцов $\text{Bi}_2(\text{Zn}_{1-x}\text{Ni}_x)_{2/3}\text{Nb}_{4/3}\text{O}_7$ характерны термостабильные диэлектрические характеристики $\epsilon=101.2$, $\tan \delta=9.5 \times 10^{-4}$ ($x=0.35$) [5]. Высокие значения диэлектрической проницаемости $\epsilon=69$ –171 и низкие значения тангенса диэлектрических потерь $\sim 10^{-3}$ (30 °С, 1 МГц) проявляет

керамика сложного состава $(\text{Bi}_{3.36}\text{Mg}_{0.64-x}\text{Ca}_x)(\text{Mg}_{1.28}\text{Nb}_{2.72})\text{O}_{13.76}$ ($0 \leq x \leq 0.7$) [7]. Для сложных танталатов висмута отмечают умеренное ухудшение диэлектрических характеристик по сравнению со сложными ниобатами, что связано, по мнению ряда авторов, с высокой пористостью материалов и уменьшением общей поляризации, обусловленной заменой атомов ниобия [8]. В частности, исследованы соединения состава $x\text{Bi}_2(\text{Zn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})_2\text{O}_7 \cdot (1-x)(\text{Bi}_{3/2}\text{Zn}_{1/2})(\text{Zn}_{1/2}\text{Ta}_{3/2})\text{O}_7$ ($0.74 \leq x < 0.30$), для которых диэлектрическая проницаемость изменяется в интервале 58 – 80 и $\tan \delta < 0.003$ [9]. Для железосодержащих пироксенов $\text{Bi}_{3.36}\text{Fe}_{2.08+x}\text{Ta}_{2.56-x}\text{O}_{14.56-x}$ ($-0.32 \leq x \leq 0.48$) характерны более высокие значения диэлектрической проницаемости в диапазоне ~78–92 и диэлектрические потери $\sim 10^{-1}$ при 1 МГц и ~ 30 °С [10]. Пироксены с общей формулой $\text{Bi}_{2.48+y}\text{Cu}_{1.92-x}\text{Ta}_{3.6+x-y}\text{O}_{14.6+3x/2-y}$ ($0.00 \leq x \leq 0.80$ и $0.00 \leq y \leq 0.60$) показали умеренные значения $\epsilon \sim 60$ –80 и низкие значения тангенса диэлектрических потерь $\tan \delta \sim 0.01$ –0.2 при 1 МГц [11]. Сопоставимые значения $\epsilon \sim 50$ –70 и $\tan \delta = 10^{-3}$ – 10^{-2} проявляют Cu, Zn-замещенные пироксены $\text{Bi}_{3.08}\text{Cu}_{1.84-x}\text{Zn}_x\text{Ta}_{3.08}\text{O}_{14.16}$ ($0 \leq x \leq 1.84$) [12].

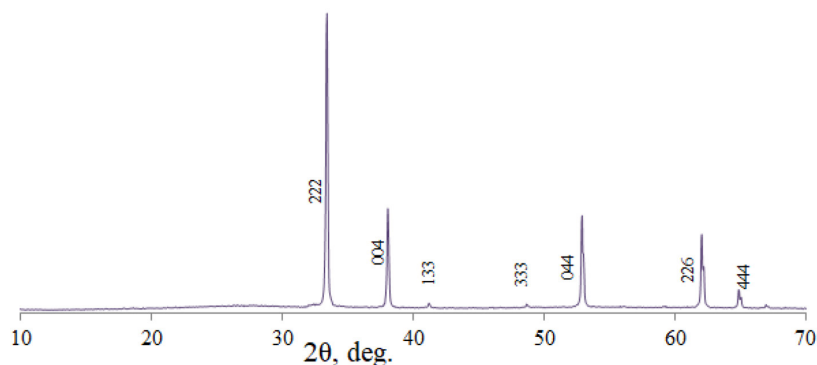
В представленной работе мы показываем результаты исследования микроструктуры и диэлектрических свойств сложного ниобата висмута-магния со структурой пироксена, полученного при замещении атомов ниобия танталом.

1. Экспериментальная часть

Синтез ниобата висмута-магния состава $\text{Bi}_2\text{MgNbTaO}_9$ проведен стандартным керамическим методом из оксидов висмута (III), тантала (V), магния (II) и ниобия (V) квалификации “ос.ч.” поэтапным обжигом при температуре 650, 850, 950 и 1100 °С. Фазовый состав образцов исследован методом рентгенофазового анализа (DRON-4-13, CuK_α), микроструктура образцов изучена с помощью электронной сканирующей микроскопии (Tescan VEGA 3LMN, энергодисперсионный спектрометр INCA Energy 450). Параметр элементарной ячейки рассчитан с использованием пакета программ CSD [13]. Для исследования электрических свойств на торцы образцов в форме дисков нанесены серебряные электроды путем вжигания серебряной пасты при 650 °С в течение 1 ч. Измерениям подвергли образцы с разной толщиной и практически одинакового диаметра (образец № 1 – $h=3.27$ мм и $D=13.15$ мм², образец № 2 – $h=2.27$ мм и $D=13.05$ мм²). Измерения выполнены с помощью измерителя иммитанса E7-28 (частотное окно наблюдений 25 – 10⁷ Гц) и импедансметра Z-1000P (окно 1 – 10⁶ Гц) в широких частотном 25 Гц до 10 МГц и температурном интервалах 25 ÷ 450 °С. Температуру образца в измерительной ячейке контролировали хромель-алюмелевой термопарой (точность измерений температуры ± 1 °С). Моделирование эквивалентных схем и расчет параметров проведен с использованием программы ZView. Измеряемые параметры, фаза и модуль импеданса, имели относительную погрешность 2 и 1 % соответственно. Относительная погрешность рассчитанных значений высокочастотной емкости составляет менее 1 %, низкочастотной – менее 10 %, диэлектрических потерь не превышает 20 %, относительная погрешность удельной электропроводности составляет менее 1 %.

2. Результаты и обсуждение

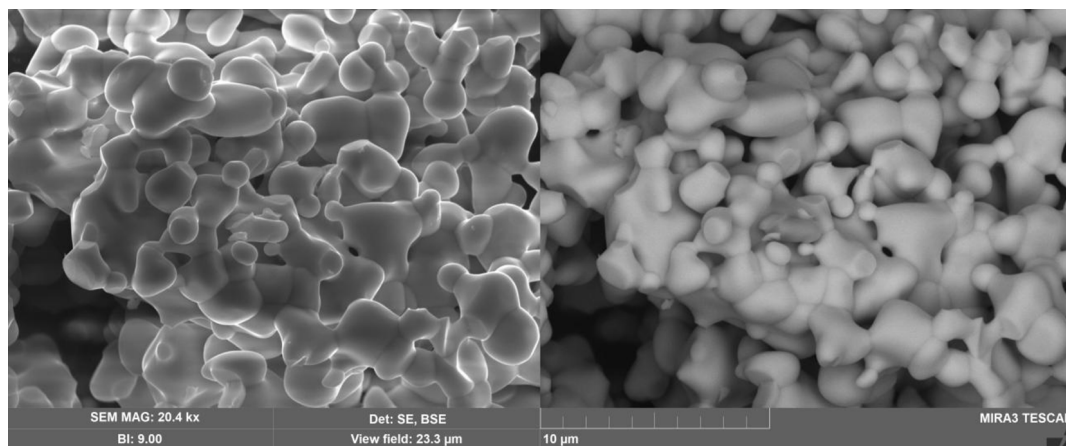
Методом РФА установлена однофазность образца состава $\text{Bi}_2\text{MgNbTaO}_9$, кристаллизующегося в кубической сингонии и имеющего структуру пироксена (пр. гр. Fd-3m), рефлексов примесных фаз не выявлено (рис. 1).

Рис. 1. Рентгенограмма $\text{Bi}_2\text{MgNbTaO}_9$ Fig. 1. X-ray diffraction patterns of the $\text{Bi}_2\text{MgNbTaO}_9$

Постоянная решетки $\text{Bi}_2\text{MgNbTaO}_9$ составляет $a=10.5439\pm 0.0009$ Å и несколько меньше параметра элементарной ячейки ниобата висмута-магния со структурой пироклора [14, 15], для которого $a=10.56$ Å. Уменьшение параметра элементарной ячейки танталсодержащих пироклоров по сравнению с ниобийсодержащими наблюдали ранее [8] и связывали с более симметричным строением Ta-O-октаэдров по сравнению с ниобий-кислородными, несмотря на равенство ионных радиусов ниобия(V) и тантала(V) ($R(\text{Nb(V)})_{\text{с.н.-6}}=0.64$ Å, $R(\text{Ta})_{\text{с.н.-6}}=0.64$ Å, $R(\text{Mg(II)})_{\text{с.н.-6}}=0.72$ Å, $R(\text{Bi(III)})_{\text{с.н.-8}}=1.17$ Å) (рис. 2).

По данным электронной сканирующей микроскопии керамика $\text{Bi}_2\text{MgNbTaO}_9$ характеризуется высокопористой микроструктурой, состоящей из хаотически ориентированных сросшихся округлых кристаллитов со средним поперечным размером 1-2 мкм (рис. 3).

Диэлектрическая проницаемость и тангенс диэлектрических потерь образцов $\text{Bi}_2\text{MgNbTaO}_9$ с разной толщиной и практически одинакового диаметра (образец № 1 – $h=3.27$ мм и $D=13.15$ мм², образец № 2 – $h=2.27$ мм и $D=13.05$ мм²) исследованы в температурном интервале

Рис. 2. Микрофотография поверхности $\text{Bi}_2\text{MgNbTaO}_9$ в режиме вторичных и упругоотраженных электроновFig. 2. Micrograph of surface in the mode of secondary and elastically reflected electrons of $\text{Bi}_2\text{MgNbTaO}_9$

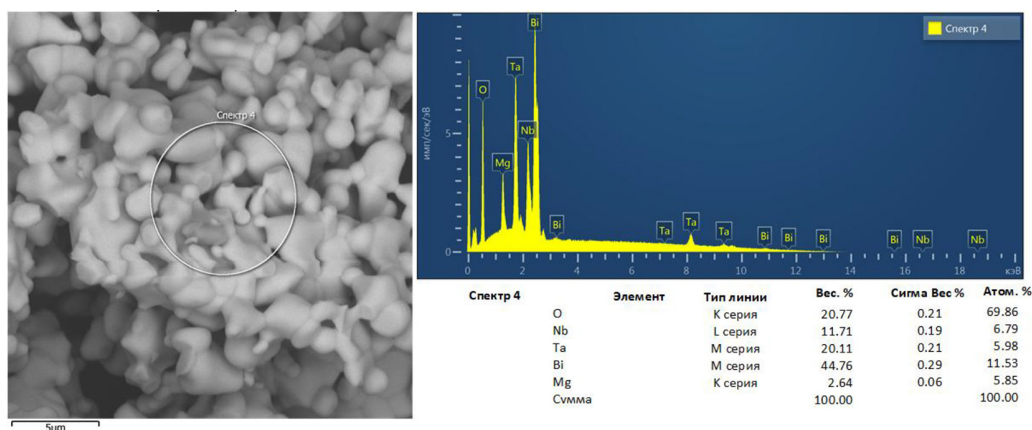


Рис. 3. Микрофотография поверхности в режиме упругоотраженных электронов и ЭДС-спектр $\text{Bi}_2\text{MgNbTaO}_9$.

Fig. 3. Micrograph of surface in the mode of elastically reflected electrons and EDS spectrum of $\text{Bi}_2\text{MgNbTaO}_9$.

18–450 °C и частотном диапазоне 25 Гц–10 МГц (рис. 4). На рис. 3 номера кривых совпадают с номерами образцов разной толщины.

При комнатной температуре (18 °C) диэлектрическая проницаемость практически постоянна в ограниченном частотном диапазоне 10^5 – 10^7 Гц и равна $\epsilon = 71$ (образец 1) и $\epsilon = 77$ (образец 2), тангенс диэлектрических потерь $\tan \delta \approx 0.002$ – 0.003 (10^6 Гц) (рис. 4).

Полученные значения диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь для $\text{Bi}_2\text{MgNbTaO}_9$ уступают характеристикам для сложных ниобатов состава $\text{Bi}_{1.5}\text{MgNb}_{1.5}\text{O}_7$ ($\epsilon=120$, 1 МГц, $\tan \delta = 0.001$) [17] и $\text{Bi}_{1.5}\text{ZnNb}_{1.5}\text{O}_7$ ($\epsilon = 130$, $\tan \delta = 0.001$) [18] и сопоставимы с характеристиками известных танталсодержащих пирохлоров [9–11]. Предполагаем, что высокие значения ϵ при частоте менее 10 кГц связаны с поглощением

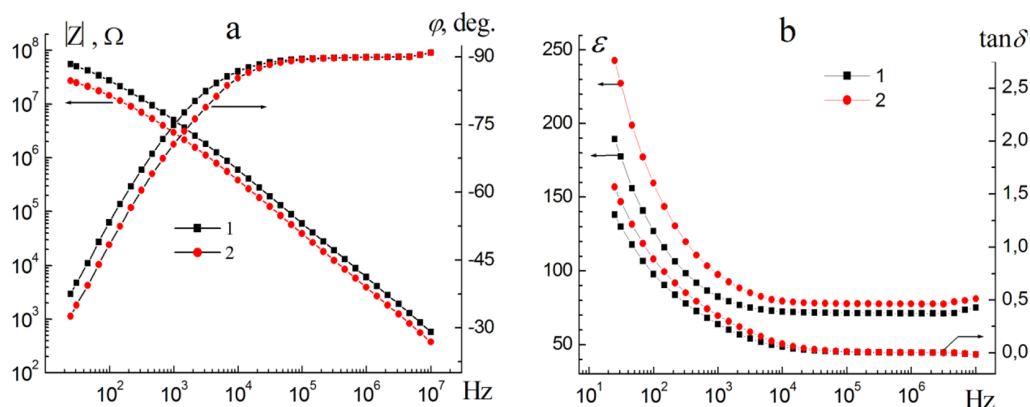


Рис. 4. Модуль и фаза импеданса (а) образцов 1, 2; диэлектрическая проницаемость (ϵ) и тангенс угла диэлектрических потерь ($\tan \delta$) в частотном диапазоне 25 – 10^7 Гц при 18 °C (б)

Fig. 4. The modulus and phase of the impedance (a) of the samples 1, 2; the dielectric permeability (ϵ) and tangent of dielectric losses ($\tan \delta$) in the frequency range 25 – 10^7 Hz at 18 °C (b)

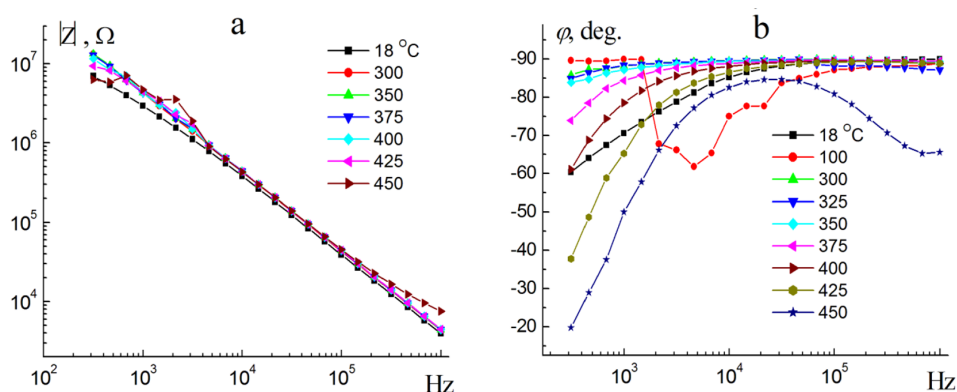


Рис. 5. Модуль и фаза импеданса образца 2 при 18 ÷ 450 °С

Fig. 5. The modulus and phase of the impedance of the sample 2 at 18 ÷ 450 °С

атмосферной воды. Проникновение воды в толстый образец затруднено, что занижает усредненную по объему диэлектрическую проницаемость и снижает также диэлектрические потери.

Влияние адсорбированной воды проявляется на зависимостях фазы импеданса (рис. 5) до 300 °С, а именно при невысоких температурах – 18 и 100 °С. Необычный вид кривой $\varphi(\omega)$ при 100 °С можно объяснить десорбцией поглощенной воды, не успевшей удалиться из образца. Последние четыре точки на кривой (область низких частот) фактически измерены после полного удаления адсорбированной воды. При последующем нагревании до 350 °С импеданс образца практически остается неизменным. При температуре выше 375 °С в низкочастотной области наблюдается поляризационный процесс. При 450 °С происходит значительное изменение электрических свойств в области высоких частот. При указанной температуре возможна десорбция химически адсорбированной воды, которая может находиться в виде ОН-групп на поверхности. В этом случае уменьшается протонная проводимость, что приводит к увеличению модуля импеданса образца (рис. 5a).

Более толстый образец (№ 1), по-видимому, менее гидратирован (рис. 6). Поэтому эффекты, связанные с термодесорбцией воды, отсутствуют. При измерении импеданса этого образца выдержка между моментом установления заданной температуры и началом измерения была увеличена до 300 с. Из данных рис. 6b следует, что построение эквивалентной схемы (ЭС) возможно только для температур 375 – 450 °С. Структуру ЭС определили из формы годографа импеданса образца (рис. 6).

Из данных рис. 7 следует, что годографы имеют форму дуги, кривизна которых, на первый взгляд, постоянна. Следовательно, для моделирования можно использовать две простых ЭС (рис. 7b, c). Эквивалентная схема b (рис. 7b) позволяет отделить омические потери (резистор R) от диэлектрических потерь (резистор R_0). Моделирование было проведено с помощью программы ZView (Scribner Associates Inc.). После определения величины всех элементов ЭС можно рассчитать тангенс угла диэлектрических потерь по формуле $\tan \delta = \omega R_0 C$ [19]. В процессе моделирования программа ZView определяла величину R_0 с относительной погрешностью около 80 %, причем средние значения R_0 имели величину менее 100 Ом. Таким образом, точное

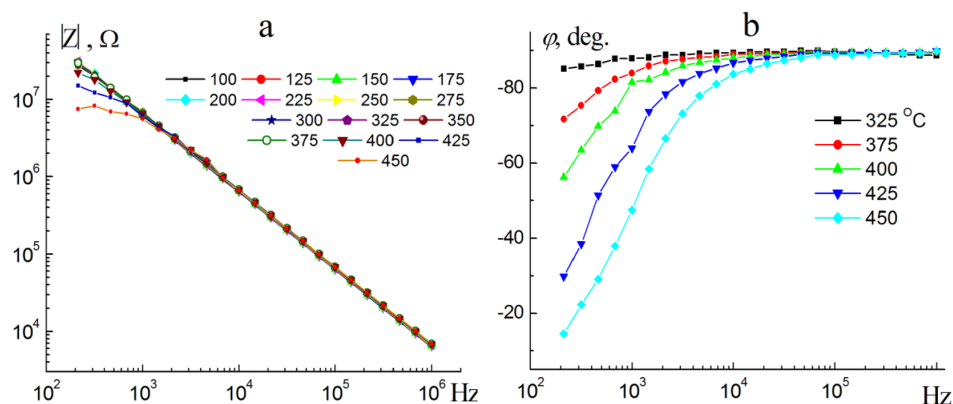


Рис. 6. Модуль и фаза импеданса образца 1 при 18 ÷ 450 °C

Fig. 6. The modulus and phase of the impedance of the sample 1 at 18 ÷ 450 °C

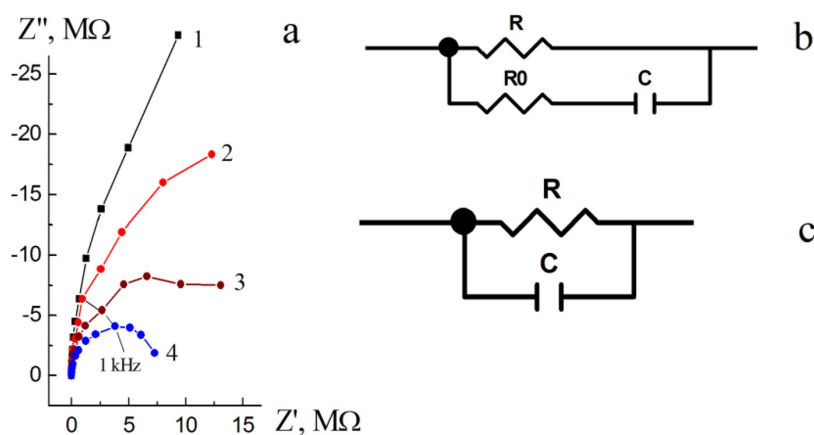


Рис. 7. Годографы импеданса образца 1, измеренные при температурах 375 (1); 400 (2); 425 (3) и 450 °C (4) (a). Диапазон частот от 200 Hz до 1 MHz. Эквивалентные схемы, использованные для моделирования импеданса образца 1 (b, c)

Fig. 7. Hodographs of impedance of the sample 1 measured at temperatures 375 (1); 400 (2); 425 (3) and 450 °C (4) (a). Frequency range from 200 Hz to 1 MHz. Equivalent circuits used to simulate the impedance of sample 1 (b, c)

измерение диэлектрических потерь оказалось невозможным. Моделирование с помощью эквивалентной схемы на рис. 7c показало, что величина емкости C в первом приближении не зависит от температуры и частоты и равна 23.4 pF (относительная ошибка 0.7 %). Соответственно, диэлектрическая проницаемость равна $\epsilon = 62$. При комнатной температуре $\epsilon = 71$ (см. рис. 4). Таким образом, исследуемый материал в диапазоне частот 200 Гц – 1 МГц поляризуется по электронному механизму.

С помощью эквивалентной схемы на рис. 7c было определено сквозное сопротивление образца R для четырех значений температур и рассчитана его удельная проводимость σ . При построении температурной зависимости $\sigma(T)$ в координатах Аррениуса получена линейная зависимость (рис. 8), из наклона которой была рассчитана энергия активации проводимости ($E = 1.28 \pm 0.03$ eV).

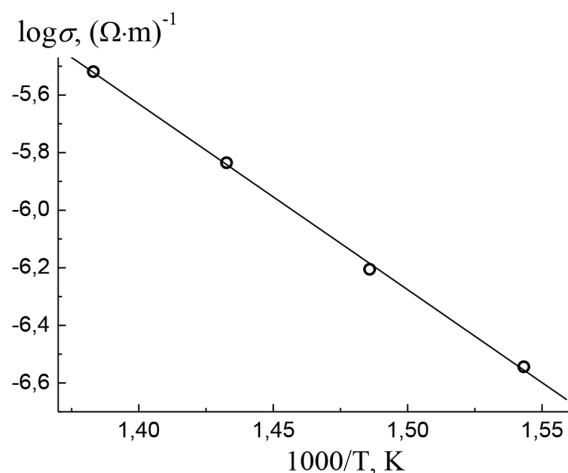


Рис. 8. Температурная зависимость сквозной проводимости образца 1 при 375 ÷ 450 °С

Fig. 8. Temperature dependence of conductivity of the sample 1 at 375 ÷ 450 °С

Величина энергии активации характерна для прыжковой электронной проводимости по глубоким «ловушкам» (квантовым состояниям). У образцов с малой проводимостью отделить омические потери от диэлектрических потерь удастся не всегда. В этом случае омическими потерями пренебрегают и $\tan \delta$ рассчитывают из фазы импеданса φ , так как они связаны друг с другом: $\varphi + \delta = \pi/2$. Следовательно, для расчета можно воспользоваться формулой $\operatorname{tg} \delta = \operatorname{ctg} \varphi$. На рис. 9 приведены температурные зависимости $\tan \delta$, измеренные на постоянных частотах.

Диэлектрические потери слабо зависят от температуры для частот более 100 кГц, что указывает на электронный характер поляризации. При частотах порядка единиц кГц возможно участие в поляризации ионов (например, на межзеренных границах), активность которых увеличивается при повышении температуры (кривая 1 на рис. 9).

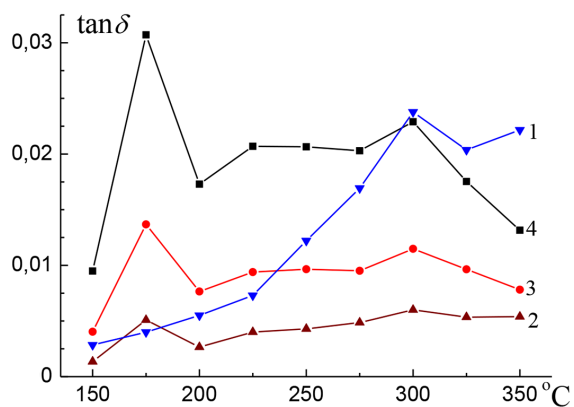


Рис. 9. Температурные зависимости тангенса диэлектрических потерь для образца 1 при частотах 3 (1), 100 (2), 200 (3) и 460 (4) kHz

Fig. 9. Temperature dependences of the dielectric loss tangent for the sample 1 at frequencies of 3 (1), 100 (2), 200 (3), and 460 (4) kHz

Заклучение

Исследованные материалы являются диэлектриками с диэлектрической проницаемостью 62 – 71, с тангенсом угла диэлектрических потерь от 0.003 до 0.02. Сквозная проводимость уверенно регистрируется при температурах выше 375 °С. Ее температурная зависимость подчиняется закону Аррениуса с энергией активации 1.28 эВ. Наиболее вероятный механизм переноса электронов – прыжковый по глубоким ловушкам. Ионный перенос не обнаружен.

Список литературы / References

1. Pandey J., Shrivastava V., Nagarajan R. Metastable $\text{Bi}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ with Pyrochlore-like Structure: Stabilization, Oxygen Ion Conductivity, and Catalytic Properties. *Inorg. Chem.* 2018. Vol. 57. P. 13667–13678.
2. Giampaoli G., Siritanon T., Day B., Li J., Subramanian M.A. Temperature in-dependent low loss dielectrics based on quaternary pyrochlore oxides, *Prog. Solid State Chem.* 2018. Vol. 50. P. 16–23.
3. Guo Q., Li L., Yu S., Sun Z., Zheng H., Luo W. Temperature–stable dielectrics based on Ni-doped $\text{Bi}_2\text{Zn}_{2/3}\text{Nb}_{4/3}\text{O}_7$ pyrochlore ceramics for low temperature co-fired ceramic. *J. Alloys Comp.* 2018. Vol. 767. P. 259–263.
4. Hassan A., Mustafa G.M., Abbas S.K., Atiq S., Saleem M., Riaz S., Naseem S. Correlation of La-mediated structural transition and dielectric relaxation in $\text{Bi}_2\text{Mg}_{2/3}\text{Nb}_{4/3}\text{O}_7$ pyrochlores. *Ceram. Intern.* 2019. Vol. 45. P. 14576-14585.
5. Guo Q., Li L., Yu S., Sun Z., Zheng H., Li J., Luo W. Temperature–stable dielectrics based on Cu–doped $\text{Bi}_2\text{Mg}_{2/3}\text{Nb}_{4/3}\text{O}_7$ pyrochlore ceramics for LTCC. *Ceram. Intern.* 2018. Vol. 44. P. 333–338.
6. Tan P.Y., Tan K.B., Khaw C.C., Zainal Z., Chen S.K., Chon M.P. Phase equilibria and dielectric properties of $\text{Bi}_{3+(5/2)x}\text{Mg}_{2-x}\text{Nb}_{3-(3/2)x}\text{O}_{14-x}$ cubic pyrochlores. *Ceram. Intern.* 2014. Vol. 40. P. 4237–4246.
7. Dasin N.A.M., Tan K.B., Khaw C.C., Zainal Z., Lee O.J., Chen S.K. Doping mechanisms and dielectric properties of Ca-doped bismuth magnesium niobate pyrochlores. *Mater. Chem. Phys.* 2019. Vol. 242. P. 122558.
8. Chon M.P., Tan K.B., Zainal Z., Taufiq-Yap Y.H., Tan P.Y., Khaw C.C., Chen S.K. Synthesis and Electrical Properties of Zn-substituted Bismuth Copper Tantalate Pyrochlores. *Intern. J. Appl. Ceram. Technol.* 2016. Vol. 13. P. 718–725.
9. Youn H.-J., Sogabe T., Randall C.A., Shrout T.R., Lanagan M.T. Phase Relations and Dielectric Properties in the $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-ZnO-Ta}_2\text{O}_5$ System. *J. Am. Ceram. Soc.* 2001. Vol. 84. P. 2557–2562.
10. Jusoh F.A., Tan K.B., Zainal Z., Chen S.K., Khaw C.C., Lee O.J. Novel pyrochlores in the $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Ta}_2\text{O}_5$ (BFT) ternary system: synthesis, structural and electrical properties. *J. Mater. Res. Technol.* 2020. Vol. 9. P. 11022-11034.
11. Chon M.P., Tan K.B., Khaw C.C., Zainal Z., Taufiq-Yap Y.H., Chen S.K., Tan P.Y. Subsolvus phase equilibria and electrical properties of pyrochlores in the $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CuO-Ta}_2\text{O}_5$ ternary system. *J. Alloy. Comp.* 2016. Vol. 675. P. 116–127.
12. Chon M.P., Tan K.B., Zainal Z., Taufiq-Yap Y.H., Tan P.Y., Khaw C.C., Chen S.K. Synthesis and Electrical Properties of Zn-substituted Bismuth Copper Tantalate Pyrochlores. *Intern. J. Appl. Ceram. Technol.* 2016. Vol. 13. P. 718–725.

13. Akselrud L.G., Grin Yu.N., Zavalii P.Yu., Pecharski V.K., Fundamentalski V.S. *CSD, an universal program package for single crystal and/or powder structure data treatment. Twelfth European Crystallogr. Meeting, Collected Abstracts, Moscow, 1989.*
14. Zhuk N.A., Makeev B.A., Nekipelov S.V., Korolev R.I., Utkin A.A., Chernykh G.I. Magnetic susceptibility and NEXAFS spectra of Fe, Mg-codoped bismuth niobate pyrochlore. *Lett. Mater.* 2021. Vol. 11. P. 67-72.
15. Zhuk N.A., Makeev B.A., Nekipelov S.V., Yermolina M.V., Fedorova A.V., Chernykh G.I. Magnetic behavior of Fe-doped of multicomponent bismuth niobate pyrochlore. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2021. Vol. 60. P. 38-46.
16. Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallogr. A.* 1976. Vol. 32. P. 751-767.
17. Zhang Y., Zhang Z., Zhu X., Liu Z., Li Y., Al-Kassab T. Dielectric properties and microstructural characterization of cubic pyrochlored bismuth magnesium niobates. *Appl. Phys. A.* 2013. Vol. 115. P. 661–666.
18. Osman R.A.M., Masó N., West A.R. Bismuth Zinc Niobate Pyrochlore, a Relaxor-Like Non-Ferroelectric. *J. Am. Ceram. Soc.* 2011. Vol. 95. P. 296–302.
19. Lasia A. *Electrochemical impedance spectroscopy and its applications.* New York: Springer Science+Business Media, 2014. 369 p.