

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-3-246-252>

УДК 538.956:621.382

## Влияние условий получения керамических материалов системы $\text{BaO} - \text{Sm}_2\text{O}_3 - 4\text{TiO}_4$ на формирование сверхвысоких частотных свойств

А. К. Летко<sup>1)</sup>, кандидаты физ.-мат. наук, доценты Г. К. Савчук<sup>2)</sup>, Н. П. Юркевич<sup>2)</sup>, А. П. Ахмедов<sup>3)</sup>, докт. филос. по техн. наукам, доц. С. Б. Худойберганов<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению» (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>3)</sup>Ташкентский государственный транспортный университет (Ташкент, Республика Узбекистан)

**Реферат.** Получен частотный керамический материал с высокой температурной стабильностью резонансной частоты, что гарантирует устойчивую работу устройств на его основе при изменении температур. В статье представлены результаты влияния условий получения на микроструктуру и диэлектрические свойства, а также на микроволновые параметры керамики. Для получения материала использован метод твердофазного синтеза, который проводился при температуре 1000 °С и времени синтеза 2 ч с последующим термическим обжигом. Показано, что оптимальные микроволновые свойства керамики состава  $\text{BaSm}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  имеют при температурах спекания в интервале 1360–1380 °С. Установлено, что путем изменения температуры спекания значение диэлектрической проницаемости керамического материала можно увеличить почти в два раза. Экспериментально определены резонансные частоты керамики для различных температурных режимов спекания. Значения резонансных частот материалов варьируются от 6,7 до 8,9 ГГц. Получено, что добротность керамического материала вблизи резонансных частот существенно зависит от рабочих температур, при температурах выше 40 °С наблюдается снижение добротности керамического материала на 22–30 %. Путем изучения частотных зависимостей действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости исследуемых керамик установлены возможные механизмы поляризации. Показано, что резонансный характер дисперсии диэлектрической проницаемости характерен для интервала частот 100–900 МГц. На частотах гигагерцового интервала преобладает дипольная и миграционная поляризация. Полученные керамики благодаря своим свойствам в гигагерцовом диапазоне частот могут использоваться для изготовления подложек для микрополосковых антенн и СВЧ-схем, а также в качестве диэлектрических резонаторных антенн и компонентов систем спутниковой и мобильной связи.

**Ключевые слова:** диэлектрические свойства, микроструктура,  $\text{BaSm}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ , резонансная частота, микроволновые свойства, частотные зависимости, антенна, добротность, диэлектрическая проницаемость, поляризация

**Для цитирования:** Летко, А. К. Влияние условий получения керамических материалов системы  $\text{BaO} - \text{Sm}_2\text{O}_3 - 4\text{TiO}_4$  на формирование сверхвысоких частотных свойств / А. К. Летко, Г. К. Савчук, Н. П. Юркевич, А. П. Ахмедов, С. Б. Худойберганов // *Наука и техника*. 2026. Т. 25, № 3. С. 246–252. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-3-246-252>

## The Influence of Production Conditions of $\text{BaO} - \text{Sm}_2\text{O}_3 - 4\text{TiO}_4$ Ceramic Materials on the Formation of Microwave Properties

А. К. Letko<sup>1)</sup>, G. K. Sauchuk<sup>2)</sup>, N. P. Yurkevich<sup>2)</sup>, A. P. Akhmedov<sup>3)</sup>, S. B. Khudoyberganov<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>State Scientific and Production Association “Scientific and Practical Center for Materials Science of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>3)</sup>Tashkent State Transport University (Tashkent, Republic of Uzbekistan)

**Abstract.** A frequency-dependent ceramic material with high temperature stability of the resonant frequency has been obtained, which guarantees stable operation of devices based on it when temperatures change. The article presents the results

### Адрес для переписки

Юркевич Наталья Петровна  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 29 117-99-79  
[jurkevich@bntu.by](mailto:jurkevich@bntu.by)

### Address for correspondence

Yurkevich Natalia P.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 29 117-99-79  
[jurkevich@bntu.by](mailto:jurkevich@bntu.by)

of the influence of the production conditions on the microstructure and dielectric properties, as well as on the microwave parameters of ceramics. The solid-phase synthesis method was used to obtain the material. The synthesis was carried out at a temperature of 1000 °C for 2 h with subsequent thermal firing. It is shown that the optimal microwave properties of BaSm<sub>2</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> ceramics are obtained at sintering temperatures in the range of 1360–1380 °C. It is established that by changing the sintering temperature, the dielectric permeability of the ceramic material can be increased almost twice. The resonant frequencies of ceramics for various sintering temperature regimes were determined experimentally. The resonant frequencies of the materials range from 6.7 to 8.9 GHz. It is found that the quality factor of the ceramic material near the resonant frequencies significantly depends on the operating temperatures. At operating temperatures above 40 °C, a decrease in the quality factor of the ceramic material by 22–30 % is observed. By studying the frequency dependencies of the real and imaginary parts of the dielectric permittivity of the ceramics under study, possible polarization mechanisms were established. It is shown that the resonant nature of the dielectric permittivity dispersion is characteristic of the 100–900 MHz frequency range. At gigahertz frequencies, dipole and migration polarization prevail. Due to their properties in the gigahertz frequency range, the ceramics obtained can be used for the manufacture of substrates for microstrip antennas and microwave circuits, as well as for dielectric resonator antennas and components of satellite and mobile communication systems.

**Keywords:** dielectric properties, microstructure, BaSm<sub>2</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub>, resonance frequency, microwave properties, frequency dependencies, antenna, quality factor, dielectric permittivity, polarization

**For citation:** Letko A. K., Sauchuk G. K., Yurkevich N. P., Akhmedov A. P., Khudoyberganov S. B. (2026) The Influence of Production Conditions of BaO – Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4TiO<sub>4</sub> Ceramic Materials on the Formation of Microwave Properties. *Science and Technique*. 25 (3), 246–252 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-3-246-252>

## Введение

Система BaO – Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4TiO<sub>4</sub> (система BST) представляет научный интерес до настоящего времени, поскольку диэлектрические свойства керамик на ее основе могут быть использованы в ускорительной технике [1], для изготовления диэлектрических резонаторов для низкопрофильных квадратных антенн с большой полосой пропускания [2, 3], а также для термисторов [4].

Однофазная керамика состава BaSm<sub>2</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> спекается при 1380–1400 °C, что приводит к большим энергозатратам при ее получении. Для снижения температур спекания предпринимались различные методы [5–8]. Авторы [5, 6] сначала синтезировали соединение BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub>, затем на стадии спекания вводили добавку Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Керамика BaSm<sub>2</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> была получена при 1200 °C [5, 6] и продолжительности спекания 6 ч. Однако с введением добавки Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> величина диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  значительно уменьшилась и находилась в пределах 36,65–39,8 (при температурах спекания 1325–1400 °C у керамики BaSm<sub>2</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> диэлектрическая проницаемость порядка 65–80 [7]). Также наблюдалось снижение добротности ( $Q \times f$ ) с 28000 до 19000, а температурный коэффициент частоты  $\tau_f$  уменьшился с  $+20,2 \cdot 10^{-6}$  (1/°C) до  $+10,1 \cdot 10^{-6}$  (1/°C).

Использование прекурсора полиакриламида для синтеза СВЧ-диэлектрической керамики BaSm<sub>2</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> позволило авторам [8] получить однофазный керамический порошок BaSm<sub>2</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> при температуре спекания 1250 °C (время спекания 2 ч). При этом значение диэлектрической проницаемости составляло 77, величина добротности ( $Q \times f$ ) более 11000.

Цель данной работы – получение керамик на основе системы BaO – Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4TiO<sub>4</sub> с высокими диэлектрическими параметрами и исследование частотных зависимостей диэлектрической проницаемости в рабочем диапазоне температур.

## Экспериментальная часть

Для синтеза керамических образцов на основе системы BaO – Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4TiO<sub>4</sub> в качестве исходных реактивов использовались BaCO<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, которые были взяты в соответствии со стехиометрической формулой. Синтез соединения BaSm<sub>2</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> (BST) производился при температурах 1000 °C в течение 2 ч.

После синтеза порошки BaSm<sub>2</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> подвергались длительному (6 ч) помолу в среде изопропилового спирта, далее из высушенных порошков прессовались таблетки диаметром 8 или 12 мм при давлении  $p = 100$  МПа. Спекание осуществлялось при температурах (1200–1380) °C в течение 2–6 ч по обычной керамической технологии [9].

Фазовый состав получаемых образцов после процессов синтеза и спекания контролировался с помощью рентгенофазового анализа, который производился в  $\text{CuK}\alpha$  монохроматическом излучении в диапазоне углов  $20^\circ$ – $60^\circ$  (рис. 1).

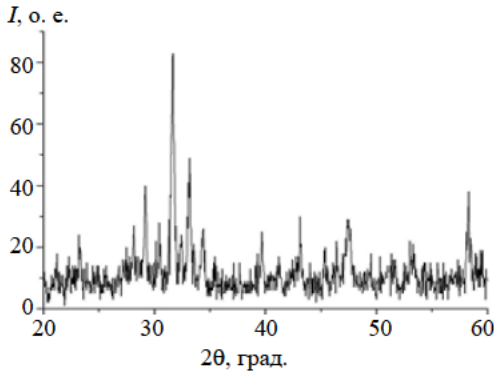


Рис. 1. Рентгенограмма однофазного керамического образца BST ( $T_{\text{спек}} = 1360^\circ\text{C}$ )

Fig. 1. X-ray diffraction pattern of a single-phase ceramic BST sample ( $T_{\text{sintering}} = 1360^\circ\text{C}$ )

Параметры элементарной кристаллической ячейки керамик уточнялись методом Ритвельда [9]. Керамические образцы имеют ромбическую кристаллическую решетку с параметрами кристаллической решетки:  $a = 22,286 \text{ \AA}$ ;  $b = 12,150 \text{ \AA}$ ;  $c = 3,837 \text{ \AA}$ .

Диэлектрические измерения керамических образцов производились на частотах 1 кГц и 1 МГц с помощью моста Е7-8.

Частотные измерения мнимой и действительной частей диэлектрической проницаемости осуществлялись с помощью анализатора Е5071С фирмы Agilent Technologies [10].

## Результаты и обсуждение

Однофазная керамика состава  $\text{BaSm}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  (рис. 1), используемая для исследований, была получена в лаборатории электронной керамики Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению» при температурах  $1360$ – $1380^\circ\text{C}$  и длительности спекания 2–4 ч (рис. 2).

Микроструктура полученных образцов BST (рис. 2) представляет собой совокупность пластинчатых зерен правильной формы, размеры которых варьируются в зависимости от температур спекания от 1–8 мкм ( $1360^\circ\text{C}$ ) до 1–4 мкм ( $1380^\circ\text{C}$ ).

Результаты исследования диэлектрических параметров в зависимости от условий получения (табл. 1, рис. 3) показали, что наиболее высокими диэлектрическими свойствами обладают керамики, полученные при температуре спекания  $1380^\circ\text{C}$ .

При росте частоты от 1 кГц до 1 МГц (табл. 1) происходит снижение значений диэлектрической проницаемости, что указывает на релаксационный характер дисперсии диэлектрической проницаемости.

Изучение диэлектрических свойств (рис. 3) и результаты измерений СВЧ параметров в диапазоне рабочих для устройств на их основе температур ( $30$ – $80^\circ\text{C}$ ) (табл. 2) показали высокую температурную стабильность диэлектрической проницаемости вблизи резонансной частоты.

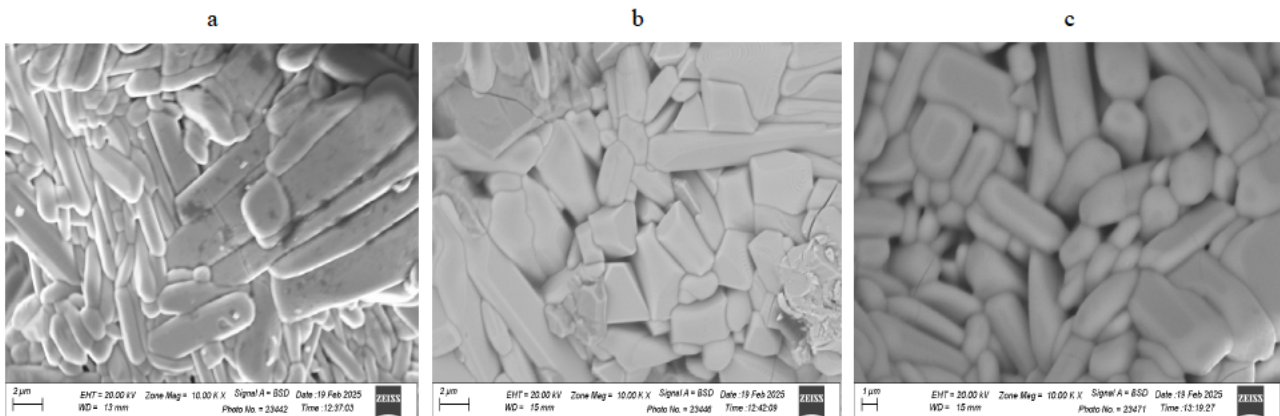


Рис. 2. Микроструктура керамик состава  $\text{BaSm}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  при увеличении 10000 в зависимости от температур спекания:  $a - 1360^\circ\text{C}$ ;  $b - 1370^\circ\text{C}$ ;  $c - 1380^\circ\text{C}$  (время спекания 2 ч)

Fig. 2. Microstructure of  $\text{BaSm}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics at a magnification of 10000 depending on sintering temperature:  $a - 1360^\circ\text{C}$ ;  $b - 1370^\circ\text{C}$ ;  $c - 1380^\circ\text{C}$  (sintering time 2 h)

Таблица 1

**Диэлектрические параметры керамик BST  
в зависимости от условий получения**  
**Dielectric parameters of BST ceramics depending  
on the conditions of production**

№ п/п	Состав	$T_{\text{спек.}}$ °C/время спекания	1 кГц		1 МГц	
			$\epsilon$	$\text{tg}\delta$	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$
1	BST	1360 / 2 ч	47,80	0,013	32,05	0,0090
2	BST	1370 / 2 ч	53,50	0,022	34,30	0,0090
3	BST	1370 / 4 ч	61,70	0,030	44,00	0,0065
4	BST	1380 / 1 ч	86,89	0,030	65,30	0,0050

В пределах одной и той же температуры спекания изменения значений диэлектрической проницаемости незначительные и составляют 1–1,5 % (табл. 2). В то же время добротность материала вблизи резонансных частот существенно зависит от рабочего диапазона температур. При температурах выше 40 °C наблюдается снижение добротности на 22–30 %.

Возможные механизмы поляризации в полученных керамиках определялись путем исследования частотных зависимостей действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости (рис. 4).

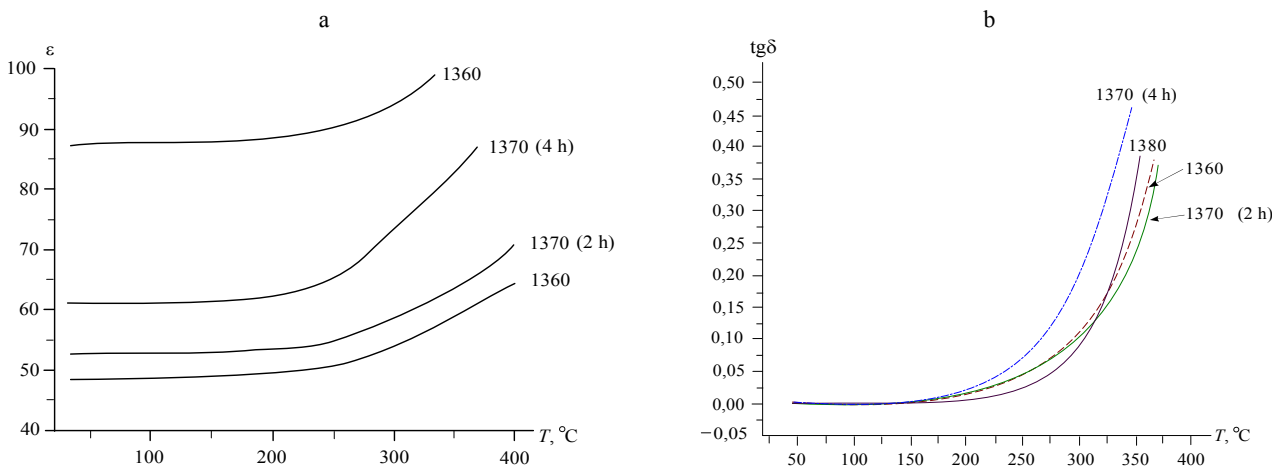


Рис. 3. Вид температурных зависимостей: а – диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ ; б – тангенса диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$

Fig. 3. Type of temperature dependencies: а – dielectric permittivity  $\epsilon$ ; б – dielectric loss tangent  $\text{tg}\delta$

Таблица 2

**Значения СВЧ параметров керамических BST образцов вблизи резонансных частот  
в зависимости от условий получения**  
**Values of microwave parameters of ceramic BST samples near resonance frequencies  
depending on the conditions of production**

$T_{\text{спек.}}$ , °C / время спекания	Размер		Волновод			
	$t$ , мм	$\varnothing$ , мм	$T$ , °C	$f_r$ , ГГц	$Q \times f_r$	$\epsilon$
1	2	3	4	5	6	7
360 – 2 ч	3,066	8,139	32,5	7,4009	5375	33,698
			40	7,4002	5195	33,705
			50	7,3967	2973	33,736
			60	7,3934	2573	33,767
			70	7,3908	3415	33,790
			80	7,3899	3761	33,799
1370 – 2 ч	1,922	7,931	32	8,4054	438	36,920
			40	8,4011	775	36,958
			50	8,4004	759	36,964
			60	8,9800	500	32,346
			70	8,3950	335	37,012
			80	8,3940	338	37,020

1	2	3	4	5	6	7
1370 – 4 ч	1,793	7,482	31,8	7,6110	691	50,975
			40	7,6065	359	51,035
			50	7,6031	555	51,081
			60	7,6008	876	51,112
			70	7,6001	903	51,121
			80	7,6000	883	51,123
1380 – 1 ч	2,056	7,125	32	6,7503	1037	63,136
			40	6,7497	880	63,147
			50	6,7490	683	63,160
			60	6,7454	365	63,228
			70	6,7437	348	63,260
			80	6,7436	351	63,262

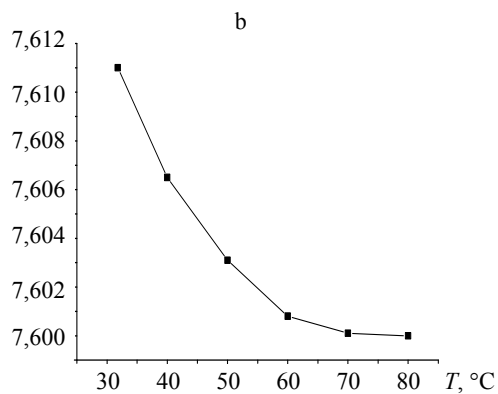
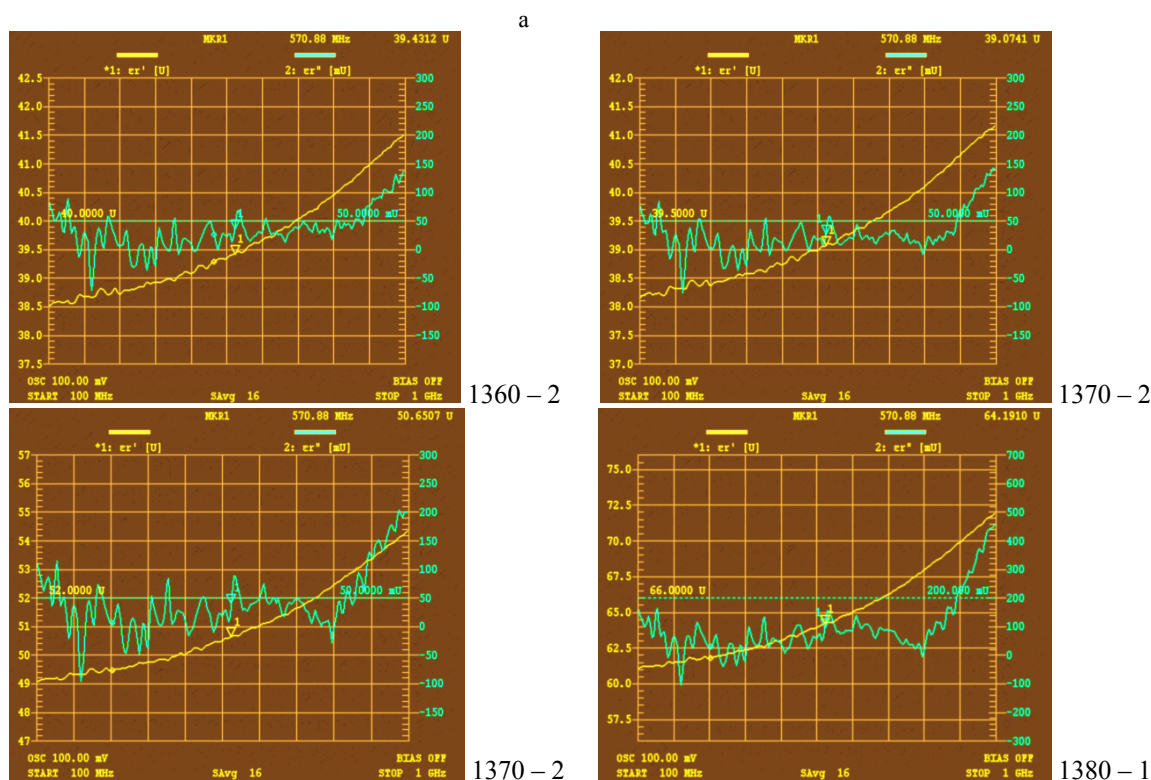


Рис. 4. Частотные зависимости (от 100 МГц до 1 ГГц) действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости:  
а – для различных температур и времени спекания;  
б – температурная зависимость резонансной частоты  $f_r$  образцов при  $T_{\text{спек}} = 1370 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 4. Frequency dependences (from 100 MHz to 1 GHz) of the real and imaginary parts of the dielectric permittivity:  
а – for different temperatures and sintering times;  
б – temperature dependence of the resonant frequency  $f_r$  of samples at  $T_{\text{sintering}} = 1370 \text{ }^\circ\text{C}$

Действительная часть диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'_r$ ) является мерой энергии внешнего электрического поля, запасенной в материале. В диапазоне частот 100–900 МГц  $\epsilon'_r$  монотонно растет (рис. 4а) для всех измеренных температур. Такой характер изменения  $\epsilon'_r$  с частотой свидетельствует о резонансном характере дисперсии диэлектрической проницаемости в полученной керамике. На микроскопическом уровне несколько диэлектрических механизмов могут вносить вклад в поведение диэлектрика. Такой характер изменения соответствует дипольной и миграционной поляризациям, которые, как правило, и проявляются на сверхвысоких частотах. Атомарные и электронные механизмы поляризации относительно слабые и обычно не зависят от частоты в СВЧ диапазоне.

Температурные измерения показали, что с ростом температуры нагревания керамик уменьшается время релаксации диполей, следовательно, увеличивается их подвижность, что приводит к росту значения диэлектрической проницаемости (рис. 3).

Мнимая часть диэлектрической проницаемости ( $\epsilon''_r$ ) (рис. 4а) называется коэффициентом потерь и характеризует потери энергии, или то, как сильно материал поглощает энергию внешнего электрического поля. Рост мнимой части диэлектрической проницаемости происходит по мере приближения к резонансной частоте. Высокочастотный максимум может быть связанным с дипольной поляризацией.

Изучение поведения резонансной частоты  $f_r$  от температуры (рис. 4б) показало ее высокую температурную стабильность. Изменения резонансной частоты в зависимости от значений рабочих температур составляет тысячные доли (рис. 4б), что подтверждает высокую термостабильность полученных керамических образцов.

## ВЫВОДЫ

1. В результате исследований получены однофазные керамические образцы состава  $\text{BaSm}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ , которые обладают термостабильными СВЧ параметрами. Резонансные частоты

полученных материалов лежат в интервале от 6,7 до 8,9 ГГц.

2. Проведенные диэлектрические измерения показали, что малые диэлектрические потери и наиболее высокие значения диэлектрической проницаемости ( $\epsilon \geq 85$ ) имеют образцы, полученные при  $T_{\text{спек}} = 1380$  °С. Все образцы обладают повышенной термостабильностью резонансной частоты в рабочем интервале температур 20–80 °С.

3. Установлено, что при рабочих температурах свыше 40 °С добротность СВЧ-материала начинает снижаться несмотря на высокую термостабильность резонансной частоты, что свидетельствует о различных физических механизмах, отвечающих за термостабильность и добротность.

4. Полученный набор СВЧ параметров позволит использовать изученную керамику  $\text{BaSm}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  в различных областях СВЧ техники. Антенны, изготовленные на базе этого материала, могут быть использованы в мобильных устройствах и спутниковых системах, для которых малость размеров устройств имеет очень важное значение.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Электрически управляемые компоненты на основе керамики BST-Mg для применения в ускорительной технике / Е. А. Ненашева, А. Д. Канарейкин, А. И. Дедык, Ю. В. Павлова // Физика твердого тела. 2009. Т. 51, вып. 8. С. 1468–1472.
2. Панич, А. Е. Физика сегнетоэлектрической керамики / А. Е. Панич. Ростов н/Д.: ЮФУ, 2002. 42 с.
3. Yang, C.-F. Microwave Properties of  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x)\text{Sm}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  Ceramics and Their Application in Dielectric Resonator Antenna / C.-F. Yang // Japanese Journal of Applied Physics. 2000. Vol. 39, № 3R P. 1430. <https://doi.org/10.1143/JJAP.39.1430>
4. New High Temperature NTC Thermistors Based on  $\text{BaSm}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  Ceramics / R. Wu, Y. Lin, Y. Liu [et al.] // Materials Letters. 2021. Vol. 304. Art. 130683. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130683>
5. Tailoring Microwave Dielectric Properties of  $\text{BaTi}_4\text{O}_9$  Ceramics by Addition of  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  / X. Huang, Y. Song, F. Wang, E. Zhang // Journal of the Ceramic Society of Japan. 2010. Vol. 118, is. 1384. P. 1135–1139. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.118.1135>
6. Low Temperature Sintering of  $\text{BaO-Sm}_2\text{O}_3-4\text{TiO}_2$  Ceramics / K.-H. Cho, J.-B. Lim, S. Nahm, H. T. Kim [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. 2007. Vol. 27, No 2/3. P. 1053–1058. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceram.soc.2006.05.061>

7. The Reaction Sequence and Dielectric Properties of BaSm<sub>2</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> Ceramics / P.-S. Cheng, Ch.-F. Yang, Y.-Ch. Chen, W.-Ch. Tzou // *Ceramics International*. 2000. Vol. 26, No 8. P. 877–881. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(00\)00030-4](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(00)00030-4).
8. Tailoring Microwave Dielectric Properties of BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> Ceramics by Addition of Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / X. Huang, P. Wang, Q. Sun, Y. Song // *Key Engineering Materials*. 2007. Vol. 336–338. P. 252–254. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.336-338.252>
9. Акимов, А. И. Керамические материалы (диэлектрические, пьезоэлектрические, сверхпроводящие): условия получения, структура, свойства / А. И. Акимов, Г. К. Савчук. Минск: Изд. центр БГУ, 2012. 256 с.
10. Дамор, Д. Новый уровень характеристик для ВЧ-анализаторов цепей / Д. Дамор // *Компоненты и технологии*. 2012. № 4. С. 198–199.

Поступила 26.01.2026

Подписана в печать 27.03.2026

Опубликована онлайн 29.05.2026

#### REFERENCES

1. Nenasheva E. A., Kanareykin A. D., Dedyk A. I., Pavlova Yu. V. (2009) Electrically Controlled BST-Mg Ceramic Components for Applications in Accelerator Technology. *Physics of the Solid State*, 51 (8), 1557–1560. <https://doi.org/10.1134/s1063783409080046>
2. Panich A. E. (2002) *Physics of Ferroelectric Ceramics*. Rostov-on-Don, Southern Federal University. 42 (in Russian).
3. Yang, C.-F. Microwave Properties of (Ba<sub>1-x</sub>Sm<sub>x</sub>)Sm<sub>2</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> Ceramics and Their Application in Dielectric Resonator Antenna. *Japanese Journal of Applied Physics*, 39 (3R), 1430. <https://doi.org/10.1143/JJAP.39.1430>
4. Wu R., Lin Y., Liu Y., Chang A., Zhang B. (2021) New high temperature NTC thermistors based on BaSm<sub>2</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> ceramics. *Materials Letters*, 304, 130683. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130683>
5. Huang X., Song Y., Wang F., Zhang E. (2010) Tailoring Microwave Dielectric Properties of BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> Ceramics by Addition of Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 118 (1384), 1135–1139. <https://doi.org/10.2109/jcersj.118.1135>.
6. Cho K.-H., Lim J.-B., Nahm S., Kim H.-T., Kim J.-H., Paik J.-H., Lee H.-J. (2007) Low Temperature Sintering of BaO-Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-4TiO<sub>2</sub> Ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 27 (2/3), 1053–1058. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.061>
7. Cheng P.-S., Yang C.-F., Chen Y.-C., Tzou W.-C. (2000) The Reaction Sequence and Dielectric Properties of BaSm<sub>2</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> Ceramics. *Ceramics International*, 26 (8), 877–881. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(00\)00030-4](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(00)00030-4)
8. Huang X. L., Wang F. P., Sun Q., Song Y. (2007) Tailoring Microwave Dielectric Properties of BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> Ceramics by Addition of Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Key Engineering Materials*, 336–338, 252–254. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.336-338.252>
9. Akimov A. I., Savchuk G. K. (2012) *Ceramic Materials (Dielectric, Piezoelectric, Superconducting): Production Conditions, Structure, Properties*. Minsk, Publishing Center of Belarusian State University. 256 (in Russian).
10. Damor D. (2012) New Level of Performance for RF Network Analyzers. *Komponenty i Tekhnologii* [Components and Technologies], (4), 198–199 (in Russian).

Received: 26.01.2026

Accepted: 27.03.2026

Published online: 29.05.2026