

ISSN 1561-2430 (Print)

ISSN 2524-2415 (Online)

УДК 538.956:621.382

<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-3-332-340>

Поступила в редакцию 05.06.2018

Received 05.06.2018

Г. К. Савчук¹, А. К. Летко², Н. А. Басов²¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь²Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь**УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЧ-КЕРАМИКИ СОСТАВОВ $(1-x)(\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{TiO}_3-x\text{CaTiO}_3$**

Аннотация. Представлены результаты исследований температурной и частотной зависимостей диэлектрических характеристик СВЧ-керамики составов $(1-x)(\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{TiO}_3-x\text{CaTiO}_3$ ($(1-x)(\text{MZT})-x\text{CT}$) ($0,1 \leq x < 0,6$), синтезированной из смеси оксидов (первый способ) и из смеси предварительно полученных твердого раствора $(\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{TiO}_3$ и соединения CaTiO_3 (второй способ), а также керамик данных составов, допированных на стадии спекания 1–2 % олова и вольфрама. Показано, что синтезированная керамика представляет собой композит, состоящий из смеси фаз, образующихся на основе твердых растворов $(\text{Zn}, \text{Mg})_2\text{TiO}_4$, $(\text{Zn}, \text{Mg})\text{TiO}_3$ и соединения CaTiO_3 , соотношение которых в керамике зависит от состава исходной шихты и условий синтеза. Установлено, что диэлектрическая проницаемость (ϵ) керамики, синтезированной из смеси оксидов, увеличивается с увеличением содержания CaTiO_3 в системе $(1-x)(\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{TiO}_3-x\text{CaTiO}_3$. Данная керамика характеризуется малыми значениями температурного коэффициента диэлектрической проницаемости (TK_ϵ) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) в области температур 20–200 °С. Для керамики, синтезированной по второму способу, высокая температурная стабильность TK_ϵ и малое значение $\text{tg}\delta$ наблюдаются в области температур 20–150 °С. Допирование керамик оксидами олова и вольфрама приводит к увеличению ϵ и снижению диэлектрических потерь.

Ключевые слова: СВЧ-керамика, диэлектрические свойства, температурные зависимости диэлектрической проницаемости, частотные зависимости диэлектрической проницаемости

Для цитирования. Савчук, Г. К. Условия получения и диэлектрические свойства СВЧ-керамики составов $(1-x)(\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{TiO}_3-x\text{CaTiO}_3$ / Г. К. Савчук, А. К. Летко, Н. А. Басов // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2018. – Т. 54, № 3. – С. 332–340. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-3-332-340>

G. K. Sauchuk¹, A. K. Letko², N. A. Basau²¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus²Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus**PRODUCTION CONDITIONS AND DIELECTRIC PROPERTIES OF MICROWAVE CERAMICS BASED ON $(1-x)(\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{TiO}_3-x\text{CaTiO}_3$ COMPOSITIONS**

Abstract. The results of investigation of the temperature and frequency dependences of the dielectric characteristics of microwave ceramics of $(1-x)(\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{TiO}_3-x\text{CaTiO}_3$ ($(1-x)(\text{MZT})-x\text{CT}$) ($0,1 \leq x < 0,6$) compositions synthesized from a mixture of oxides (the first method) and from a mixture of a pre-prepared solid solution of $(\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{TiO}_3$ and a CaTiO_3 compounds (the second method), as well as ceramics of these compositions doped at the stage of sintering 1–2 % tin and tungsten are presented. It is shown that the synthesized ceramics is a composite consisting of a mixture of phases formed on the basis of solid solutions of $(\text{Zn}, \text{Mg})_2\text{TiO}_4$, $(\text{Zn}, \text{Mg})\text{TiO}_3$ and the CaTiO_3 compounds, the ratio of which in ceramics depends on the composition of the initial mixture and the synthesis conditions. It is established that the dielectric constant (ϵ) of ceramics synthesized from a mixture of oxides increases with increasing CaTiO_3 content in the $(1-x)(\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{TiO}_3-x\text{CaTiO}_3$ system. This ceramics is characterized by small values of the temperature coefficient of dielectric constant (TK_ϵ) and the dielectric loss tangent ($\text{tan}\delta$) in the temperature range of 20–200 °C. For ceramics synthesized according to the second method, the high temperature stability of TK_ϵ and the small value of $\text{tan}\delta$ are observed in the temperature range of 20–150 °C. Doping ceramics with tin and tungsten oxides leads to an increase in ϵ and a decrease in dielectric losses.

Keywords: microwave ceramics, dielectric properties, temperature dependences of dielectric constant, frequency dependences of dielectric constant

For citation. Sauchuk G. K., Letko A. K., Basau N. A. Production conditions and dielectric properties of microwave ceramics based on $(1-x)(\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{TiO}_3-x\text{CaTiO}_3$ compositions. *Vestsi Natsyional'noi akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 332–340 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-3-332-340>

Введение. СВЧ-электроника является в настоящее время важной составляющей развития всей электронной индустрии. Возможности новых микроэлектронных СВЧ-технологий и тесно связанных с ними цифровых микроэлектронных технологий позволяют развиваться телекоммуникационной индустрии, производству контрольно-измерительного и аналитического оборудования и т. д. [1].

Конденсаторы – это один из самых массовых компонентов современной электронной техники, и в настоящее время в связи с быстрым развитием микроэлектроники потребность в них непрерывно растет [1], поэтому разработка новых конденсаторных материалов остается одной из актуальных задач.

Высокочастотные (с частотой до сотен мегагерц и более) конденсаторы предназначаются для использования в резонансных контурах и цепях, где требуются малые потери и высокая стабильность электроемкости. Они необходимы в системах мобильной и волоконно-оптической связи, беспроводных технологиях, СВЧ-системах локальной передачи данных, досмотровых комплексах безопасности, различных радарх и т. д.

Малые потери и высокая стабильность ϵ в СВЧ-конденсаторах – это параметры, которые в основном зависят от характеристик используемого для их изготовления керамического диэлектрического материала. Вклад диэлектрических потерь в общие потери конденсатора является доминирующим на частотах порядка 1 МГц, поэтому именно на этих частотах определяются значения тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) керамик.

Общими требованиями, которые предъявляются для керамических СВЧ-материалов, являются широкий диапазон значений диэлектрической проницаемости (ϵ) с близким к нулю температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости (TK_ϵ) и малые диэлектрические потери, приводящие к высоким значениям добротности ($Q \sim 1/\text{tg}\delta$). Материалы для СВЧ-конденсаторов наряду с перечисленными требованиями должны обладать высокой стабильностью диэлектрических свойств в рабочих диапазонах температур и частот.

Известно [2–4], что в качестве основных компонентов для получения керамических СВЧ-диэлектриков используются соединения с упругой поляризацией (электронной и ионной). К таким соединениям относятся титаносодержащие соединения: TiO_2 , CaTiO_3 , SrTiO_3 , MgTiO_3 .

В настоящее время хорошо изучены керамические материалы на основе твердых растворов системы $\text{MgTiO}_3\text{--CaTiO}_3$, которые относятся к термостабильным материалам с низкими диэлектрическими потерями и значениями диэлектрической проницаемости от 17 до 25 [2–5]. Конденсаторные керамические материалы на основе механических смесей $\text{Mg}_2\text{TiO}_4\text{--CaTiO}_3$ при содержании 10 и 15 % CaTiO_3 имеют значения ϵ 20 и 25 соответственно, и $\text{tg}\delta \sim 2 \cdot 10^{-4}$ [6]. К термостабильным СВЧ-материалам относятся также керамики на основе системы ZnO--TiO_2 [3, 7].

Недостатком всех перечисленные выше керамических СВЧ-материалов являются низкие значения относительной диэлектрической проницаемости (<40), в то время как для конденсаторов СВЧ-диапазона ϵ должна быть >40 .

Целью данной работы являлось определение условий получения керамических СВЧ-материалов на основе системы $(1-x)(\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{TiO}_3\text{--}x\text{CaTiO}_3$ и исследование их диэлектрических свойств.

Экспериментальная часть. Разработка конденсаторных материалов основывалась на том, что матрицу составов должно составлять соединение или твердый раствор с низкими диэлектрическими потерями. В качестве матрицы для составов СВЧ-керамики был выбран твердый раствор $(\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{TiO}_3$, в который вводилась комплексная добавка, включающая титанат кальция, оксид олова и оксид вольфрама. Получение СВЧ-керамик осуществлялось двумя способами.

В первом способе синтез керамики $(1-x)((\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{--TiO}_2)\text{--}x\text{CaTiO}_3$ осуществлялся из оксидов магния MgO и цинка ZnO , диоксида титана TiO_2 и аксалата кальция CaCO_3 . Процесс синтеза порошков системы $(1-x)\text{MZT--}x\text{CT}$ производился на воздухе при температурах 950–1000 °С в течение 2–6 ч. Спекались керамики при 1200–1290 °С, продолжительность спекания составляла 2–6 ч. Введение микродобавок олова и вольфрама сверх стехиометрии в количестве 1–2 % осуществлялось перед стадией спекания, после чего спекание производилось при 1250–1310 °С.

Второй способ получения материалов системы $(1-x)((\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{--TiO}_2)\text{--}x\text{CaTiO}_3$ заключался в следующем: сначала производился синтез соединения CaTiO_3 и твердого раствора $(\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{TiO}_3$, затем полученные смеси спекались при температурах 1180–1290 °С в течение 2–4 ч.

Фазовый состав, как синтезированных порошков системы $(1-x)((\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})-\text{TiO}_2)-x\text{CaTiO}_3$, так и полученных после спекания керамик, контролировался с помощью рентгенофазового анализа. Микроанализ полученных керамических образцов проводился микроанализатором Röntec Edwin. Исследование морфологии поверхности и определение размеров зерен фаз получаемых материалов осуществлялись методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на растровом микроскопе марки LEO. Температурные измерения диэлектрических параметров образцов производились по стандартной методике [7] с помощью моста E7-8. Измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в зависимости от частоты осуществлялись при комнатной температуре на анализаторе импеданса Agilent E4991A.

Результаты и их обсуждение. Согласно фазовой диаграмме системы $\text{ZnO}-\text{TiO}_2$ [3, 7] соединение ZnTiO_3 , синтезированное при соотношении исходных компонент 1:1 при температуре 700°C , является нестабильным и при 945°C разлагается на соединение Zn_2TiO_4 и диоксид титана TiO_2 .

Введение в систему $\text{Zn}-\text{Ti}-\text{O}$ ионов магния в качестве дефектов замещения приводит к стабильности указанного соединения и при температуре 950°C образцы состава $(\text{Zn}_{0,8}\text{Mg}_{0,2})\text{O}-\text{TiO}_2$ после синтеза содержат три фазы: $45\%(\text{Zn}, \text{Mg})_2\text{TiO}_4$, $45\%(\text{Zn}, \text{Mg})\text{TiO}_3$ и $10\%\text{TiO}_2$.

При получении составов системы $(1-x)\text{MZT}-x\text{CT}$ первым способом после синтеза образцы являются неоднородными. После спекания в керамиках многофазность (рис. 1) сохраняется. Получаемые соотношения фаз при оптимальных температурах спекания представлены в табл. 1.

Таблица 1. Фазовый состав керамик системы $(1-x)\text{MZT}-x\text{CT}$, полученных первым способом, при оптимальных температурах спекания

Table 1. Ceramics phase composition of the $(1-x)\text{MZT}-x\text{CT}$ system obtained from the oxide method at optimum sintering temperatures

На основе фаз	Состав			
	0,6MZT–0,4CT	0,7MZT–0,3CT	0,8MZ–0,2CT	0,9MZT–0,1CT
$(\text{Zn}, \text{Mg})_2\text{TiO}_4$	67,8 %	72 %	82 %	88,2 %
$(\text{Zn}, \text{Mg})\text{TiO}_3$	3,3 %	6 %	6 %	6,3 %
CaTiO_3	28,9 %	22 %	12 %	5,5 %

В табл. 2 приведены значения ε и $\text{tg}\delta$ для керамических образцов системы $(1-x)((\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})-\text{TiO}_2)-x\text{CaTiO}_3$, полученных при различных температурах спекания.

При увеличении содержания титаната кальция CaTiO_3 в системе $(1-x)(\text{MZT})-x\text{CT}$ температура спекания керамик возрастает (см. табл. 2). Оптимальные температуры спекания керамических

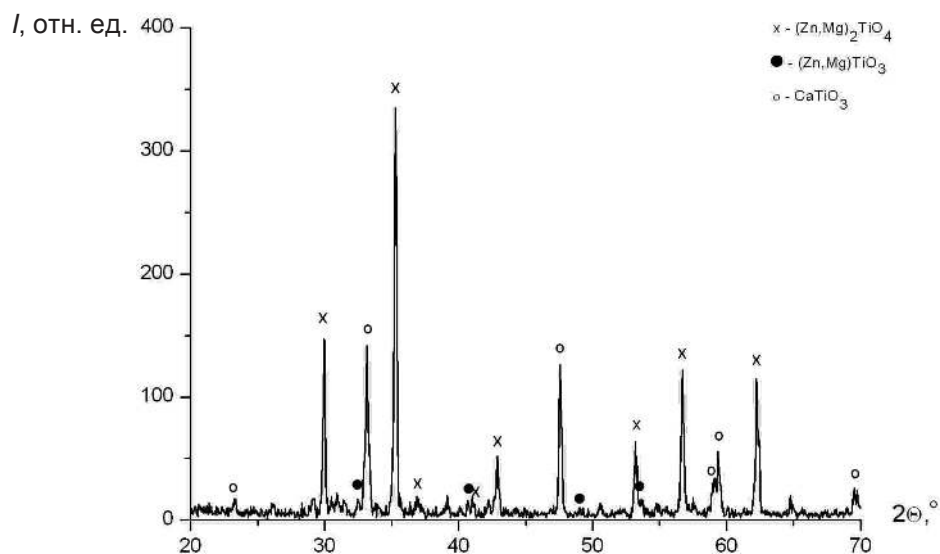


Рис. 1. Вид рентгенограмм для образцов состава 0,6MZT–0,4CT, полученных из оксидов, после спекания

Fig. 1. X-ray pattern for samples of the 0.6MZT–0.4CT composition obtained from oxides after sintering

образцов, полученных первым способом, составляют 1200 и 1220 °С при $x = 0,1$ и $0,2$ соответственно; при значениях $x \geq 0,3$, $T_{\text{спек}} \geq 1270$ °С.

Таблица 2. Значения диэлектрических параметров керамик $(1-x)\text{MZT}-x\text{CT}$ на частоте 1 МГц в зависимости от состава и температуры спекания

Table 2. Dielectric parameters of $(1-x)\text{MZT}-x\text{CT}$ ceramics at a frequency of 1 MHz depending on the composition and the sintering temperature

$T_{\text{спек}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Состав							
	0,6MZT–0,4CT		0,7MZT–0,3CT		0,8MZT–0,2CT		0,9MZT–0,1CT	
	ϵ	$\text{tg}\delta$	ϵ	$\text{tg}\delta$	ϵ	$\text{tg}\delta$	ϵ	$\text{tg}\delta$
1180	–	–	–	–	25,2	0,009	19,2	0,0095
1200	–	–	–	–	28,1	0,0083	22,0	0,0096
1220	–	–	–	–	29,2	0,0077	23,2	0,0099
1250	29,2	0,0081	33,7	0,0065	33,4	0,0081	25,1	0,0110
1270	36,0	0,0067	36,5	0,0072	–	–	–	–
1290	40,6	0,0073	42,3	0,0062	–	–	–	–

Анализ микроструктуры керамик, полученных первым способом, свидетельствует о том, что более крупные зерна (до 10–12 мкм) имеют образцы состава 0,6MZT–0,4CT (рис. 2). Более крупные зерна способствуют развитию доменной структуры и ослаблению механических напряжений, препятствующих доменной поляризации, что привело к увеличению диэлектрической проницаемости керамик. Для образцов состава 0,6MZT–0,4CT относительная диэлектрическая проницаемость составляет ~40 (см. табл. 2), в то время как для образцов 0,8MZT–0,2CT ее значения – около 29. Из рис. 3, а видно, что керамические материалы состава $(1-x)(\text{MZT})-x\text{CT}$, независимо от количества титаната кальция в них, сохраняют термостабильность ϵ в интервале температур 20–200 °С.

Таким образом, проведенные исследования показали, что изменение содержания титаната кальция в системе на основе титаната цинка-магния при первом способе получения способствует увеличению плотности и росту зерен керамических образцов, при этом диэлектрическая проницаемость с ростом содержания CaTiO_3 изменяется от 19 до 42. Керамические образцы имеют наиболее низкие диэлектрические потери и наиболее высокие значения ϵ при $x = 0,4$. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости при этом составляет $+44 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$.

Керамики системы $(1-x)(\text{MZT})-x\text{CT}$, полученные вторым способом, после спекания содержат две фазы: $(\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{TiO}_4$ и CaTiO_3 (рис. 4).

В зависимости от концентрации CaTiO_3 в образцах значения ϵ (при $T = 20$ °С на частоте 1 МГц) изменяются от 35 до 85 (табл. 3). Однако для образцов, полученных вторым способом, характерен

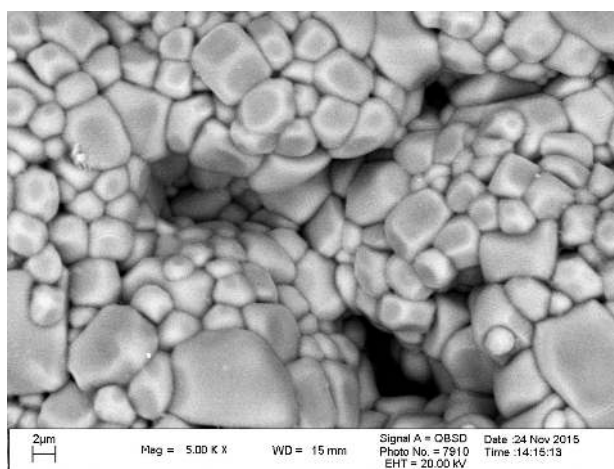


Рис. 2. Микроструктура керамик, полученных первым способом, для образцов состава 0,6MZT–0,4CT
 Fig. 2. Microstructure of ceramics obtained by the first method for samples of the 0.6MZT–0.4CT composition

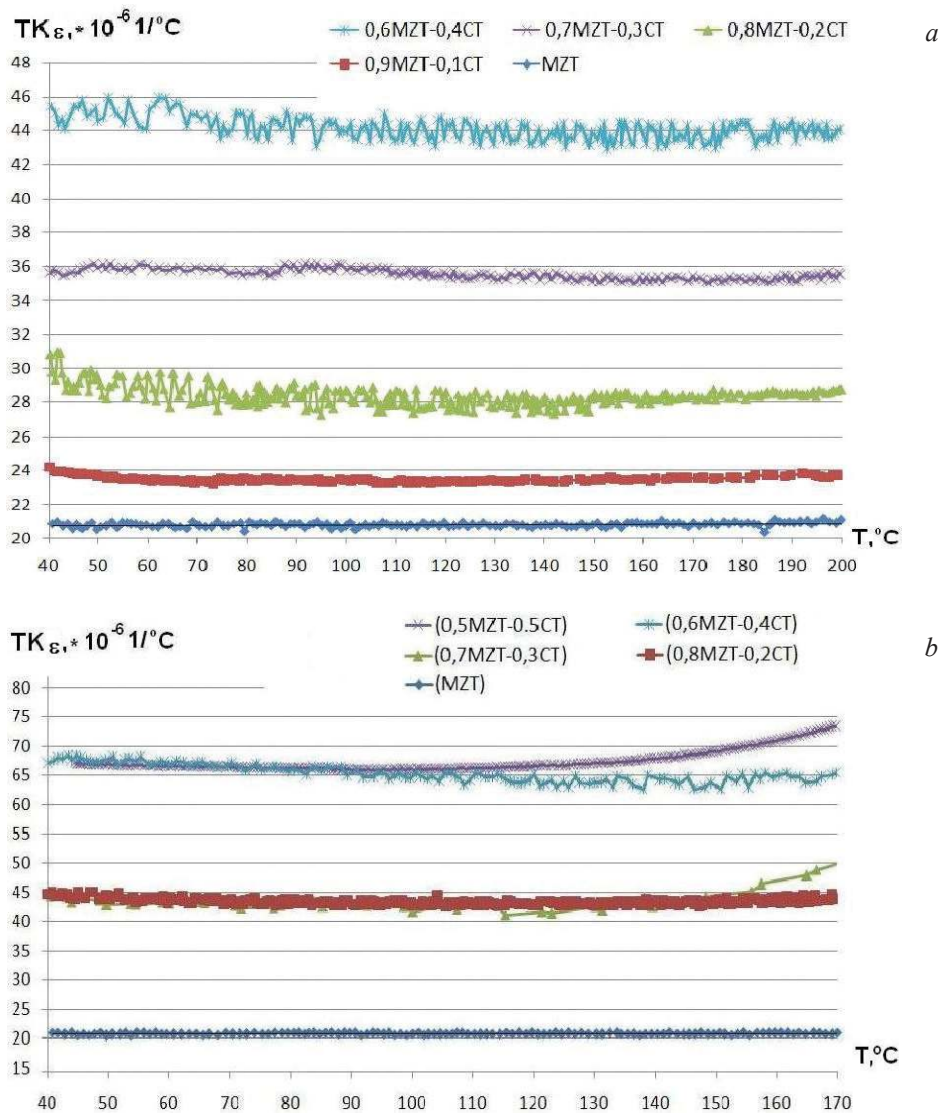


Рис. 3. Температурные зависимости ТК ϵ керамик, полученных первым (a) и вторым (b) способом

Fig. 3. Temperature dependences of TK ϵ ceramics obtained:
a – according to the first method; b – according to the second method

более узкий диапазон (20–150 °C) температурной стабильности ТК ϵ (см. рис. 3, b) и диэлектрической проницаемости (рис. 5, a).

Низкие значения tg $\delta \sim 0,48\%$, значение диэлектрической проницаемости ~ 67 и высокую температурную стабильность ТК ϵ ($+65 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$) в интервале 20–150 °C при втором способе получения имеют керамики состава 0,6MZT–0,4CT (см. табл. 3, рис. 5).

Таблица 3. Диэлектрические параметры керамик (1-x)(MZT)-xCT, измеренные при комнатной температуре на частоте 1МГц, в зависимости от температур спекания

Table 3. Dielectric parameters of (1-x)(MZT)-xCT ceramics measured at room temperature at a frequency of 1 MHz depending on sintering temperatures

$T_{\text{спек}}, ^\circ\text{C}$	Состав							
	0,8MZT-0,2CT		0,7MZT-0,3CT		0,6MZT-0,4CT		0,5MZT-0,5CT	
	ϵ	tg δ	ϵ	tg δ	ϵ	tg δ	ϵ	tg δ
1200	35,60	0,006	45,20	0,006	58,61	0,0046	75,77	0,0045
1220	37,58	0,008	50,46	0,0056	63,80	0,0047	81,40	0,004
1250	40,87	0,0075	53,47	0,0062	67,74	0,0046	85,53	0,003
1270	42,75	0,0077	55,48	0,0056	67,34	0,0048	80,62	0,0055

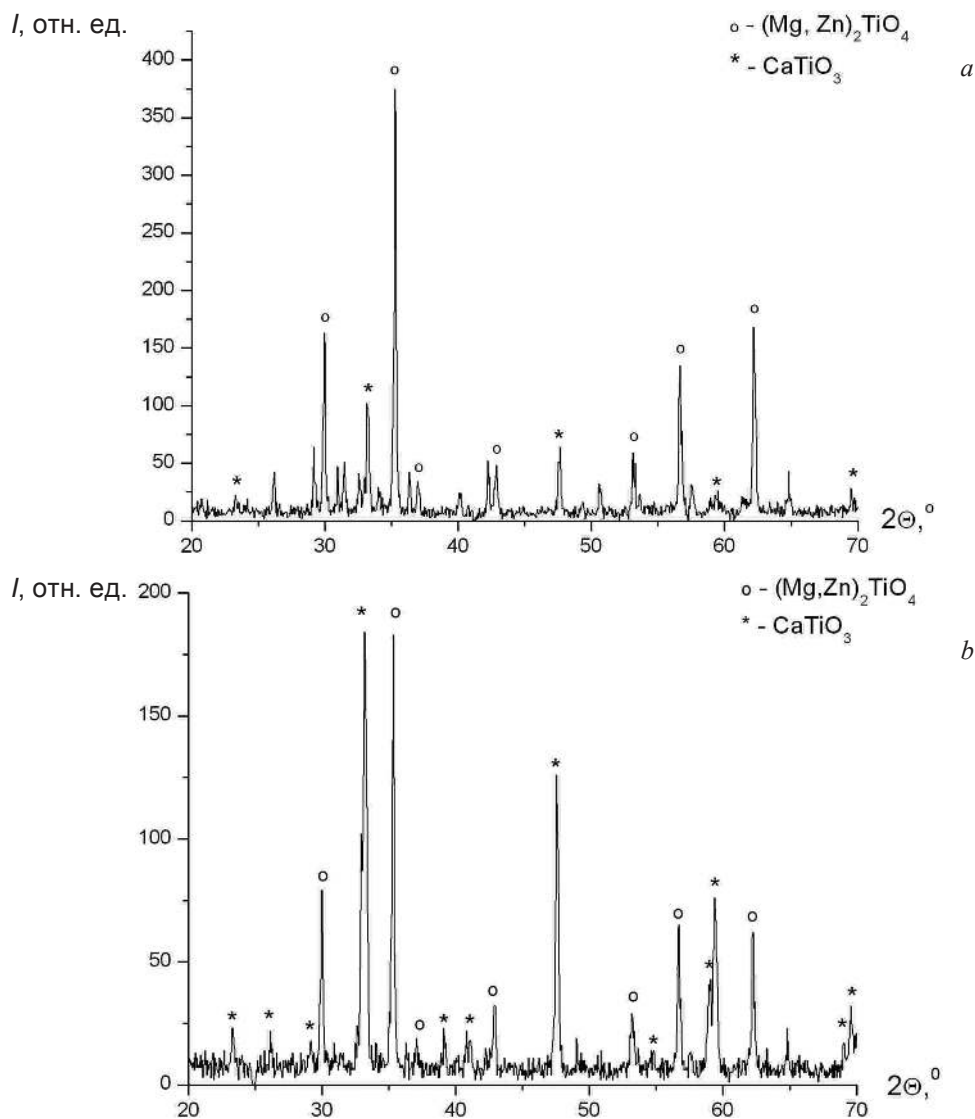


Рис. 4. Вид рентгенограмм керамик состава $(1-x)(\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{TiO}_3-x\text{CaTiO}_3$, полученных вторым способом, в зависимости от концентрации CaTiO_3 : $a - x = 0,2$; $b - x = 0,5$
 Fig. 4. X-ray diffraction patterns of ceramics of the $(1-x)(\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{TiO}_3-x\text{CaTiO}_3$ composition obtained by the second method depending on the CaTiO_3 concentration: $a - x = 0.2$; $b - x = 0.5$

Для увеличения диэлектрической проницаемости и снижения диэлектрических потерь в образцах системы $(1-x)(\text{MZT})-x\text{CT}$, получаемых при использовании первого способа, на стадии спекания в синтезированные составы были введены в качестве дефектов замещения ионы олова Sn^{+4} и в качестве дефектов внедрения ионы вольфрама W^{+2} . Ионы олова увеличивают дипольный момент кристаллической решетки, что приводит к росту диэлектрической проницаемости, а ионы вольфрама оказывают влияние на характер процесса спекания, что ведет к уменьшению диэлектрических потерь в керамических образцах. Керамики модифицированных составов 0,75MZ–0,25CT и 0,68MZ–0,32CT имеют более высокие значения диэлектрических характеристик (табл. 4).

Результаты исследований частотных зависимостей диэлектрических параметров полученных керамик [8, 9] свидетельствуют о дисперсии диэлектрической проницаемости во всем изучаемом диапазоне частот (см. табл. 4). Дисперсия диэлектрической проницаемости указывает на наличие в керамиках нескольких физических механизмов поляризации, связанных с существованием нескольких фаз с различным временем релаксации. Наблюдаемое в интервале частот (1 кГц – 200 МГц) монотонное уменьшение диэлектрической проницаемости свидетельствует о релаксационной дисперсии [9].

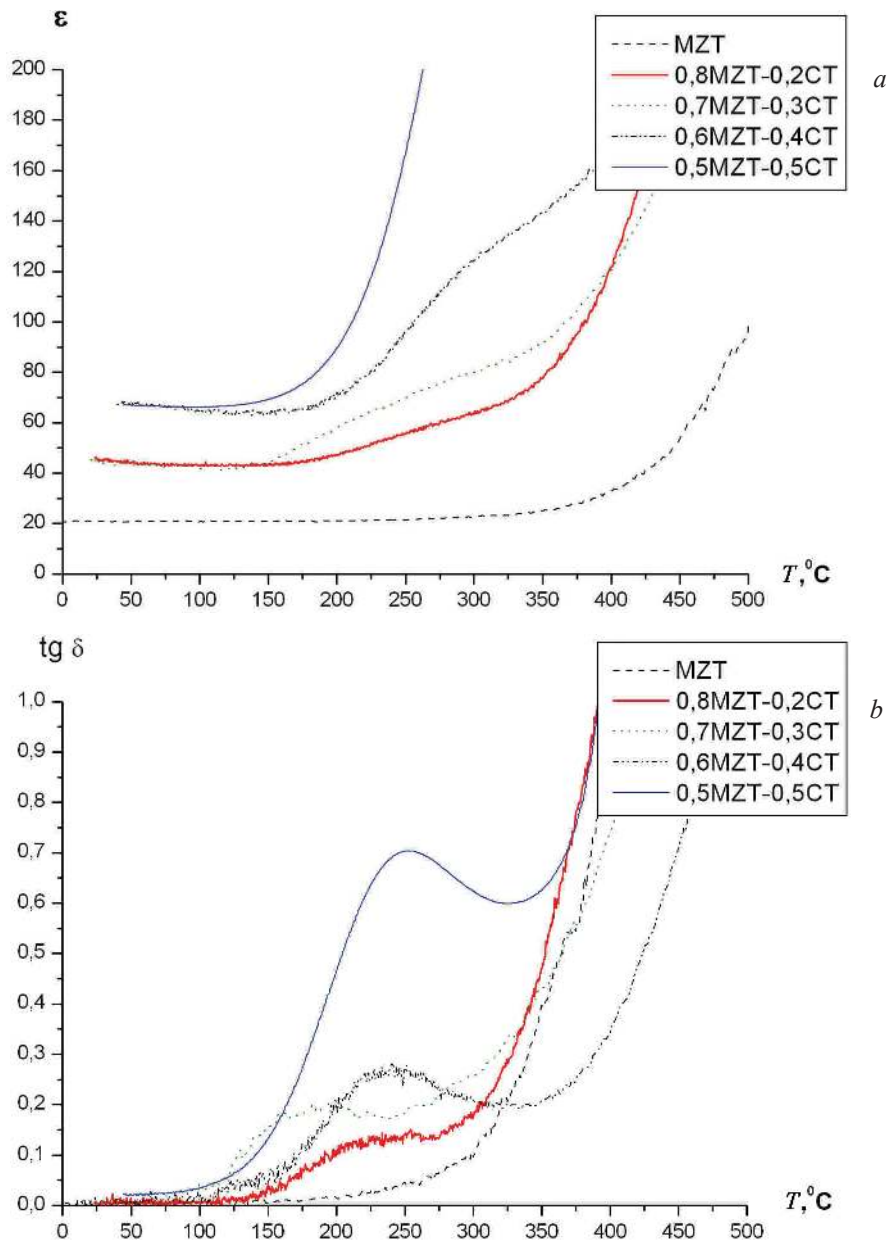


Рис. 5. Температурные зависимости ϵ (a) и $\text{tg } \delta$ (b) керамик системы $(1-x)(\text{MZT})-x\text{CT}$, полученных вторым способом, на частоте 1 кГц

Fig. 5. Temperature dependences of ϵ (a) and $\text{tan } \delta$ (b) of $(1-x)(\text{MZT})-x\text{CT}$ ceramics obtained by the second method at a frequency of 1 kHz

В диапазоне частот (200 МГц – 2 ГГц) значения диэлектрической проницаемости монотонно увеличиваются на 3–9 единиц, что указывает на резонансный характер дисперсии в данном частотном интервале.

Заключение. В результате проведенных исследований получен ряд высокочастотных конденсаторных материалов с широким диапазоном диэлектрических свойств. Установлено, что керамики, составы которых синтезированы из оксидов, могут быть использованы для изготовления на их основе СВЧ-устройств с более широким диапазоном рабочих температур, чем материалы, получаемые спеканием предварительно синтезированных фаз. Показано, что для рабочего диапазона температур меньше 150 °С могут применяться керамики состава 0,6MZT–0,4CT, получаемые вторым способом. Получено, что для керамических материалов на основе составов 0,75MZT–0,25CT и 0,68MZT–0,32CT, модифицированных ионами олова и вольфрама, в диапазоне частот от 1 кГц до 2 ГГц характерна дисперсия диэлектрической проницаемости.

Таблица 4. Частотные зависимости диэлектрических параметров керамик модифицированной системы (1-x)MZT-xCT в зависимости от состава при оптимальных температурах спекания [8]

Table 4. Frequency dependences of dielectric parameters of ceramics of the modified (1-x)MZT-xCT system as a function of composition at optimal sintering temperatures [8]

Состав	Частота												TKε·10 ⁻⁶ , 1/°C
	1 кГц		1 МГц		200 МГц		600 МГц		1 ГГц		2 ГГц		
	ε	tgδ	ε	tgδ	ε	tgδ	ε	tgδ	ε	tgδ	ε	tgδ	
0,68MZT-0,32CT	50,65	0,001	49,04	0,0057	30,7	0,0003	31,2	0,0008	32,4	0,0002	34,8	0,0008	-355
+2%SnO ₂	47,06	0,001	45,58	0,0062	29,9	0,0005	30,5	0,0003	31,8	0,0003	35,6	0,0008	-198
+2%WO ₃	54,52	0,0021	52,74	0,0058	30,6	0,0002	31,3	0,0003	32,9	0,0004	40,2	0,0008	-324
+1%SnO ₂ +1%WO ₃	54,11	0,0048	52,19	0,0056	29,5	0,0003	30,1	0,0003	31,5	0,0003	36,5	0,0008	-326
+2%SnO ₂ +2%WO ₃	52,16	0,0002	50,60	0,0057	34,8	0,0003	35,5	0,0006	37,2	0,0002	42,7	0,0009	-205
0,75MZT-0,25CT	42,10	0,0017	40,56	0,0068	24,5	0,0003	25,0	0,0003	25,9	0,0004	28,5	0,0008	-160
+2%SnO ₂	45,71	0,0028	43,77	0,0065	27,7	0,0002	28,2	0,0003	29,3	0,0006	32,8	0,0001	-110
+2%WO ₃	45,35	0,0024	43,71	0,0066	28,5	0,0002	29,1	0,0005	30,3	0,0004	33,3	0,0008	-136
+1%SnO ₂ +1%WO ₃	46,11	0,0005	45,07	0,0065	27,3	0,0003	27,8	0,0003	28,7	0,0004	32	0,0008	-99
+2%SnO ₂ +2%WO ₃	44,06	0,0004	42,22	0,0068	29,2	0,0008	29,6	0,0006	30,7	0,0003	33,5	0,0003	16

Благодарности. Исследования проводились в рамках программы ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Материаловедение и технологии материалов», (Маттех).

Acknowledgments. The present work was performed within of the State Research Program “Physical Materials Science, New Materials and Technologies”, the subprogram “Materials Science and Materials Technologies”, (Mattech”).

Список использованных источников

1. Мальцев, П. П. СВЧ-технологии – основа электроники будущего. Тенденции и рынки / П. П. Мальцев, И. В. Шахнович // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2015. – № 8. – С. 72–82.
2. New complex ceramic materials for microwave resonators / P. Petkov [et al.] // J. Optoelectronics and Advances Materials. – 2003. – Vol. 5, № 2. – P. 521–524.
3. Савчук, Г. К. Диэлектрические свойства керамических материалов на основе титанатов цинка / Г. К. Савчук, А. К. Летко, А. А. Климза // Вест. Нац. Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2011. – № 4. – С. 108–111.
4. Функциональная керамика / П. М. Плетнев [и др.]. – М.: Наука, 2004. – 348 с.
5. Kell, R. C. High-Permittivity Temperature-Stable Ceramic Dielectrics with Low Microwave Loss / R. C. Kell, A. C. Greenham, G. C. E Olds // J. Am. Ceram. Soc. – 1973. – Vol. 56, № 7. – P. 352–357. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1973.tb12684.x>
6. Раскин, А. Технология материалов микро-, опто- и нанотехнологии / А. Раскин, В. Прокофьев. – М.: Бином, 2010. – 164 с.
7. 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.
8. Летко, А. К. Условия получения и частотные зависимости диэлектрических свойств СВЧ конденсаторной керамики / А. К. Летко, Г. К. Савчук // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 13-й Междунар. конф. – Минск: Беларус. навука, 2018. – С. 232–236.
9. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – М.: Высш. шк., 1989. – 368 с.

References

1. Mal'tsev P. P., Shakhnovich I. V. Microwave technology is the basis of future electronics. Trends and Markets. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes = Electronics: Science, Technology, Business*, 2015, no. 8, pp. 72–82 (in Russian).
2. Petkov P., Iliev I., Petkova T., Vassilev V. New complex ceramic materials for microwave resonators. *Journal of Optoelectronics and Advances Materials*, 2003, vol. 5, no. 2, pp. 521–524.
3. Savchuk G. K., Letko A. K., Klimza A. A. Dielectric properties of ceramic materials based on zinc titanates. *Vestsi Natsyional'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2011, no 4, pp. 108–111 (in Russian).
4. Pletnev P. M., Rogov I. I., Vereshchagin V. I., Surzhikov A. P., Fedorov V. E. *Functional Ceramics*. Moscow, Nauka Publ., 2004. 348 p. (in Russian).
5. Kell R. C., Greenham A. C. and Olds G. C. E. High-Permittivity Temperature-Stable Ceramic Dielectrics with Low Microwave Loss. *Journal of the American Ceramic Society*, 1973, vol. 56, no. 7, pp. 352–354. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1973.tb12684.x>
6. Raskin A., Prokof'ev V. *Technology of micro-, opto- and nanotechnology materials*. Moscow, Binom Publ., 2010. 164 p. (in Russian).

7. Akimov A. I., Savchuk G. K. *Ceramic materials (dielectric, piezoelectric, superconducting): conditions of production, structure, properties*. Minsk, Publishing Center of the Belarusian State University, 2012. 256 p. (in Russian).

8. Letko A. K., Savchuk G. K. Conditions of receiving and frequency dependencies of dielectric properties of microwave condenser ceramics. *Novye materialy i tekhnologii: poroshkovaya metallurgiya, kompozitsionnye materialy, zashchitnye pokrytiya, svarka: materialy 13-i Mezhdunarodnoi konferentsii, Minsk, 16–18 maya 2018 g.* [New materials and technologies: powder metallurgy, composite materials, protective coatings, welding, Minsk, 2018]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2018, pp. 232–236 (in Russian).

9. Pasyukov V. V., Sorokin V. C. *Materials of electronic engineering*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1989. 368 p. (in Russian).

Информация об авторах

Савчук Галина Казимировна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: galya159@rambler.ru

Летко Анжелика Константиновна – научный сотрудник лаборатории «Электронная керамика», Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: letko@physics.by

Басов Никита Александрович – научный сотрудник лаборатории «Электронная керамика», Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: elkerm16@gmail.com

Information about the authors

Galina K. Sauchuk – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor of the Department of “Physics”, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: galya159@rambler.ru

Anzhelika K. Letko – Researcher of the Laboratory of Electronical Ceramics, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: letko@physics.by

Nikita A. Basau – Researcher of the Laboratory of Electronical Ceramics, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: elkerm16@gmail.com