

ды, а связанных с начальным азимутальным отклонением молекул кристалла от планарной ориентации на подложках ЖК-устройств.

### Литература

1. Самарин, А. Тенденция развития сектора ЖК-телевизоров со светодиодной подсветкой / А. Самарин // Компоненты и технологии. – 2010. – № 4. – С. 98–102.
2. Инфракрасный многоспектральный матричный преобразователь: пат. № 12175 Респ. Беларусь: МПК G01J 5/02, G01K 11/00 / А. К. Есман, В. А. Пилипович, В. К. Кулешов, Г. Л. Зыков; дата публ. 30.08.2009.
3. Развин, Ю. В. Эффект сжатия твистовой ЖК-структуры в импульсном электрическом поле / Ю. В. Развин, В. А. Потачиц // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 7-й междунар. науч.-техн. конф., 2009. – Минск, 2009. – Т. 2. – С. 375.
4. Развин, Ю. В. Роль поверхности в электрооптике твист-эффекта в жидких кристаллах / Ю. В. Развин, В. А. Потачиц // Актуальные проблемы естественных наук и их преподавания: материалы междунар. науч.- практ. конф., посвященной 100-летию МГУ им. А. А. Кулешова, 2013. – Могилев, 2013. – С. 18–21.
5. Де Жен, П. Физика жидких кристаллов / П. де Жен. – М.: Мир, 1977. – 400 с.
6. Пикин, С. А. Структурные превращения в жидких кристаллах / С. А. Пикин. – М.: Наука, 1981. – 336 с.

УДК 538.945

### Условия получения и пьезоэлектрические свойства керамических материалов на основе системы $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3-PbZrO_3-PbTiO_3$

Савчук Г. К., Юркевич Н. П.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В работе представлены результаты исследований влияния условий получения керамики системы  $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3-PbZrO_3-PbTiO_3$ , модифицированной цинком и медью, на их пьезоэлектрические параметры. Показано, что наличие оксида меди изменяет механизм спекания на жидкофазный, снижая температуры спекания на (200-240) °С. Установлено, что высокими пьезопараметрами керамики обладают при введении микродобавок в соотношении 3 масс. % ZnO + 1масс. % CuO и температуре спекания 960 °С.*

Изучение физических свойств пьезокерамических материалов непрерывно продолжается, поскольку до настоящего времени они имеют широкое практическое применение [1–2].

На сегодняшний день исследовано большое количество пьезокерамических материалов на основе систем:  $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$  (PZT),  $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$  (PNN-PT-PZ),  $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  (PNN-PT),  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  (PMN-PT). Указанные материалы имеют высокие значения пьезомодулей, однако, при этом спекаются при высоких температурах (выше 1200 °С) и не отличаются высокой надежностью при работе устройств на их основе.

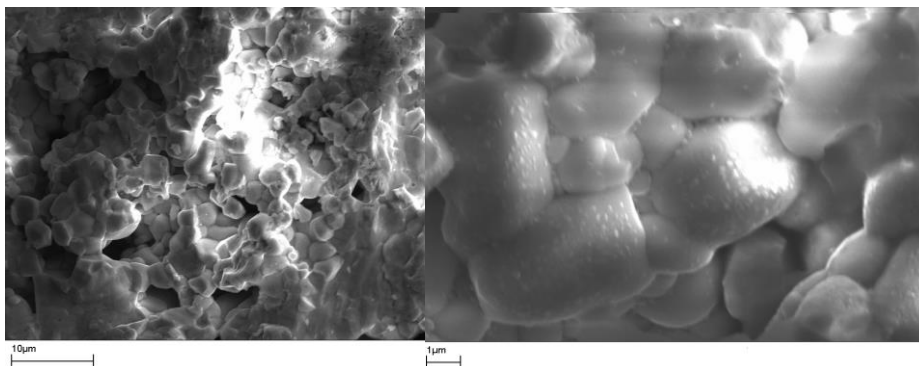
По настоящее время актуальны разработки керамик для ультразвуковых преобразователей, пьезоэлектрических приводов и датчиков акустической эмиссии [3–6]. Пьезоматериалы для этих устройств должны обладать высокими значениями пьезоэлектрических параметров и низкими температурами спекания. Низкие температуры обеспечат снижение энергетических затрат при получении материалов и возможность нанесения контактов в условиях процесса спекания, что приведет к уменьшению себестоимости изделий.

В [4] на основе системы PNN-PT, модифицированной оксидом сурьмы  $\text{Sb}_2\text{O}_5$ , были получены при температуре спекания 910 °С керамики с коэффициентом механической связи  $k_p = 0,64$ ; диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 1120$ ; пьезомодулем  $d_{33} = 379 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н. Авторы работы [5], при допировании системы  $\text{Pb}(\text{Ni}_x\text{Nb}_y)\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zn},\text{Ti})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mg},\text{W})\text{O}_3$  самарием, параметры керамических материалов улучшили ( $k_p = 0,67$ ,  $\epsilon_r = 2824$ ,  $d_{33} = 630 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н), при этом температура спекания составляла 980 °С.

Целью данной работы являлось изучение условий получения и их влияния на значения пьезоэлектрических параметров керамических материалов на основе системы  $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ , модифицированной оксидами меди и цинка.

Исследования проводились на образцах, полученных по двухстадийной керамической технологии [7]. Для изучения были приготовлены составы, имеющие, согласно фазовой диаграмме системы PNN-PT-PZ, монофазную кубическую структуру с наиболее высокими значениями пьезопараметров.

В синтезируемые твердые растворы PNN-PT-PZ оксиды меди  $\text{CuO}$  и цинка  $\text{ZnO}$  вводились на стадии процесса спекания. Наличие  $\text{CuO}$  формировало жидкую прослойку (рис. 1), что привело к изменению механизма спекания с твердофазного на жидкофазный и, соответственно, к снижению температур спекания керамик.

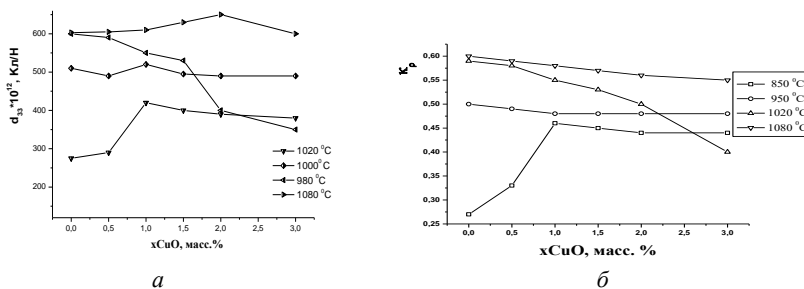


*a*

*б*

Рис. 1. Микроструктура керамики состава 0,41PNN-0,36PT-0,23PZ + 3 масс. % ZnO + 1 масс. % CuO:  
*a* – увеличение 5 000; *б* – увеличение 20 000

Введение оксида меди позволило значительно снизить температуры спекания, но при этом происходило уменьшение всех пьезоэлектрических параметров материалов (рис. 2, *a*, *б*).



*a*

*б*

Рис. 2. Пьезоэлектрические параметры керамики 0,41PNN-0,36PT-0,23PZ в зависимости от содержания оксида меди CuO и температур спекания:  
*a* – пьезомодуль  $d_{33}$ ; *б* – коэффициент электромеханической связи  $k_p$

С целью улучшения пьезоэлектрических свойств образцов одновременно с оксидом меди вводился оксид цинка. При этом образцы с наиболее высокими параметрами имели состав 0,41PNN-0,36PT-0,23PZ + 3 масс. % ZnO + 1 масс. % CuO, оставались однофазовыми с кубической кристал-

лической структурой пространственной группы Рm-3m в диапазоне температур (960–1020) °С (рис. 3). Плотность образцов достигала (96–98) % от теоретической.

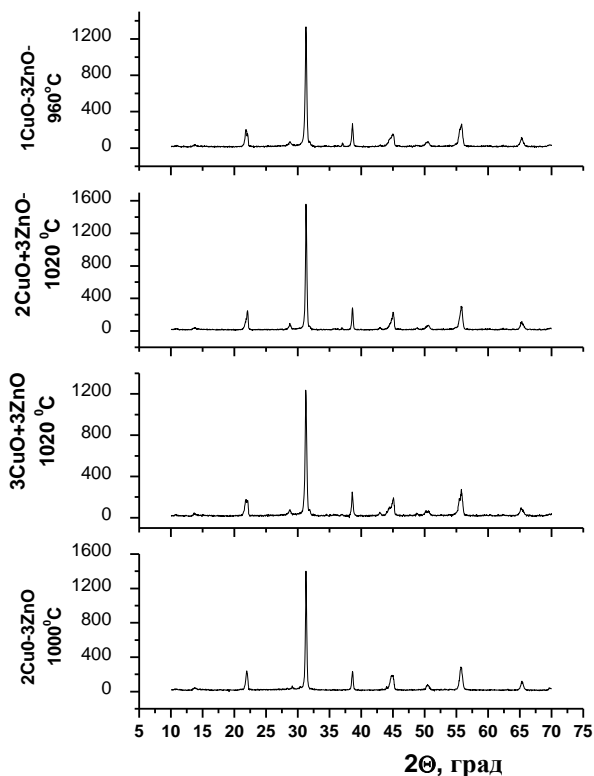


Рис. 3. Вид рентгенограмм для керамик состава 0,41PNN-0,36PT-0,23PZ ++ 3 масс. % ZnO + x масс. % CuO в зависимости от температуры спекания

Сравнительный анализ параметров кристаллической структуры исследуемых керамик, уточненных методом Ритвельда (рис. 4), показал (табл.), что при жидкофазном механизме спекания происходит уменьшение параметра  $a$  элементарной кристаллической ячейки. Данный результат говорит о том, что микродобавки не входят в элементарную кристаллическую

ячейку в виде дефектов замещения, а распределены в межзерённом пространстве.

Таблица

Параметры кристаллической структуры керамик состава 0,41PNN-0,36PT-0,23PZ в зависимости от механизма спекания

Добавки	$a$ , Å	$V$ , м <sup>3</sup>	$\rho$ , г/м <sup>3</sup>	Pb-(Ti,Zr,Ni,Nb), Å	Pb-O, Å	Ti-O, Å
0 масс.%	4,04136	66,06	8,089(1)	3,49992(6)	2,85767(1)	2,02068(4)
3масс.%ZnO +1масс.%CuO	4,03396	65,644	8,094(2)	3,49351(3)	2,85244(7)	2,01698(3)

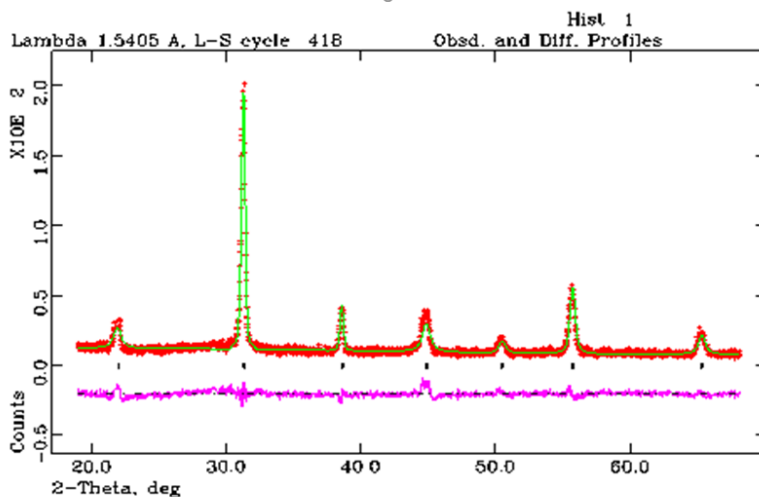


Рис. 4. Экспериментальный, теоретический и разностный графики для образцов 0,41PNN-0,36PT-0,23PZ + 3 масс. % ZnO + 1 масс. % CuO

При спекании по жидкофазному механизму происходит уменьшение основных межатомных расстояний, при этом сокращение длины связи между кислородом и титаном для образцов, полученных по жидкофазному механизму, приводит к уменьшению дипольного момента элементарной кристаллической ячейки, и, соответственно, к снижается температура Кюри.

Таким образом, в результате проведенных исследований получены пьезокерамические материалы с высокими пьезоэлектрическими параметрами ( $k_p = 0,62$ ,  $\epsilon_{33}^t/\epsilon_0 = 3300$ ,  $d_{33} = 630 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н) на основе состава 0,41PNN-0,36PT-0,23PZ, допированного на стадии спекания микродобавками в со-

отношении 3 масс. % ZnO и 1 масс. % CuO. Температура спекания составляла 960 °С.

Установлено, что керамические образцы являются однофазными с псевдокубической кристаллической структурой, сохраняют высокие значения пьезопараметров, термостабильны в интервале температур (–50–110) °С, поэтому могут быть эффективно использованы для изготовления многослойных устройств с одновременным нанесением серебряных электродов, у которых температура плавления порядка 970 °С.

### Литература

1. Akhmedov, A. The influence of production conditions on the electrophysical parameters of piezoceramics for different applications / Abduraxman Akhmedov, Galina Sauchuk, Natallia Yurkevich, Sardorbek Khudoyberganov, Mahammatyakub Bazarov, Karimberdi Karshiev // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2021. – V. 264. – P. 04020.

2. Sauchuk, H. Dielectric and microwave properties of ceramics of the Bi-Ti-O system / H. Sauchuk, N. Yurkevich, A. Akhmedov, S. Khudoyberganov, S. Kayumov, U. Berdiyarov // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – V. 401. – P. 05076.

3. Yapar, O. Structural health monitoring of bridges with piezoelectric AE sensors. / O. Yapar, P. K. Basu, P. Volgyesi, A. Ledeczki // Eng. Fail. Anal. – 2015. – V. 56. – P. 150–169. doi: 10.1016/j.engfailanal.201503009.

4. Yoo, J. Microstructure and Piezoelectric Properties of Pb(Ni<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> System Ceramics doped with Sb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> for Ultrasonic Nondestructive Testing Transducer. / J. Yoo, et.al. // Transactions on Electrical and Electronic Materials. – 2021. – V. 22, № 6. – P. 913–918.

5. Kim, H. J. The Effects of Kettlebell Exercise and Ultrasound Treatment on Body Mass Index and Percent Body Fat in 20's Adults. / H. J. Kim, M. H. Kim // J. Korean Phys. Ther. Sci. – 2018. – V. 25. – P. 804–808.

6. Yoo, J. The Effects of MnO<sub>2</sub> Addition on the Physical Properties of Pb(Ni<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>-Pb(Mg<sub>1/2</sub>W<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>-BiFeO<sub>3</sub> Ceramics. / J. Yoo, J. Lee // Crystal. – 2021. – V. 11. – P. 29–39.

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.