

24. *Nazarov D.* Obzor sovremennykh programm konechno-elementnogo analiza [Review of modern programs of finite element analysis]. Available at: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=6797> (accessed 5 March 2017).
25. *French P.J.* Polysilicon: a versatile material for Microsystems, *Sensors and actuators A Physical*, 2002, Vol. 99, pp. 3-12.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. О.А. Агеев.

**Малохатко Софья Владимировна** – Южный федеральный университет; e-mail: malohatko.sofya@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. К; тел.: +79289003841; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; магистрант.

**Гусев Евгений Юрьевич** – e-mail: eyugusev@sfedu.ru; тел: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

**Житяева Юлия Юрьевна** – e-mail: julia.jityaeva@gmail.com; аспирант.

**Быков Александр Викторович** – ФГУП «НИИ физических проблем им. Ф.В. Лукина»; e-mail: admin@niifp.ru; 124460, г. Москва, Зеленоград, проезд 4806, дом 6; тел.: +74997311306.

**Malohatko Sofya Vladimirovna** – Southern Federal University; e-mail: malohatko.sofya@yandex.ru; 2, Shevchenko street, build. K, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79289003841; the department of nanotechnology and microsystems technology; master student.

**Gusev Evgeny Yurievich** – e-mail: eyugusev@sfedu.ru; phone: +78643371611; the department of nanotechnology and microsystem technics; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Jityaeva Juliya Yurievna** – e-mail: julia.jityaeva@gmail.com; postgraduate student.

**Bykov Alexander Victorovich** – F.V. Lukin State Research Institute of Physical Problems; e-mail: admin@niifp.ru; Building 6, Passage 4806, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia; phone: +74997311306.

УДК 666.655

DOI 10.23683/2311-3103-2017-6-242-249

**М.А. Мараховский, А.А. Панич**

### **ПОЛУЧЕНИЕ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ СИСТЕМЫ PMN-PT МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ**

*Работа посвящена исследованию различных методов спекания керамики из многокомпонентной системы  $(1-x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3-xPbTiO_3$  (PMN-PT), имеющей высокий прикладной потенциал. Помимо преимуществ, материалы указанной системы обладают и недостатками, возникающими в процессе изготовления. С целью устранения недостатков при изготовлении, кроме традиционных методов спекания в камерной печи в атмосферном давлении и горячего прессования, керамические образцы были изготовлены новым перспективным методом искрового плазменного спекания (SPS). Метод SPS по сравнению с традиционным спеканием при атмосферном давлении, позволяет проводить процесс спекания за десятки минут, при сниженных на 100–300 °С, температурах спекания, обеспечивая мелкозернистую монофазную структуру керамики. Такая микроструктура способствует повышению механических и электрофизических параметров получаемой керамики. Методами рентгенофазового анализа и растровой электронной микроскопии установлены зависимости формируемой керамической структуры от одноосного механического давления при спекании и от температуры процесса. Актуальность работы состоит в совершенствовании технологического процесса изготовления керамики за счёт снижения температуры спекания, сокращения продолжительности процесса и, соответственно, сокращения энергозатрат на нагрев. Новизна работы состоит в сопоставлении результатов спекания керамики PMN-PT методом искрового плазменного спекания с результатами спекания другими способами (спекание в камерной печи, горячее прессование), сравнении полученных параметров, обозначении преимуществ и*

недостатков. Подтверждена принципиальная возможность получения методом искрового плазменного спекания с высокими электрофизическими параметрами. В качестве выводов сформулированы перспективы использования метода искрового плазменного спекания для получения функциональных керамик других систем.

*Пьезокерамика; искровое плазменное спекание (SPS); горячее прессование; микроструктура; электрофизические параметры.*

**M.A. Marakhovskiy, A.A. Panich**

### **PMN-PT SYSTEM PIEZOCERAMIC PRODUCTION USING THE METHOD OF SPARK PLASMA SINTERING**

*The work is devoted to the study of various methods of sintering ceramics from a multicomponent system  $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$  (PMN-PT), which has a high applied potential. Besides the advantages, the noted system materials have some disadvantages arising during manufacturing process. In order to eliminate the drawbacks in the manufacture, in addition to special types of sintering in vacuum furnaces in atmospheric and hot pressing, ceramic samples were manufactured by a new promising method of spark plasma sintering (SPS). The SPS method, in comparison with conventional sintering at atmospheric pressure, makes it possible to carry out the sintering process in tens of minutes, with reduced by 100–300 °C sintering temperatures, providing the fine-grained monophase structure of the ceramic. Such a microstructure helps to increase the mechanical and electrophysical parameters of the resulting ceramics. Using the methods of X-ray phase analysis and scanning electron microscopy established are the dependencies of formed ceramic structure on uniaxial mechanic pressure when sintering and temperature process. The urgency of the work is to improve the technological process of making ceramics by reducing the sintering temperature, shortening the duration of the process and, accordingly, reducing energy costs for heating. The novelty of the work is to compare the results of the sintering of PMN-PT ceramics by the method of spark plasma sintering with the calculation of sintering of other methods, by comparing the parameters, indicating the advantages and disadvantages. The principal possibility of obtaining spark plasma sintering with high electrophysical parameters has been confirmed. As a conclusion, the prospects of using the spark plasma sintering method for obtaining functional ceramics of other systems are formulated.*

*Piezoceramics; spark plasma sintering (SPS); hot pressing; microstructure; electrophysical parameters.*

**Введение.** Наряду с общеизвестными пьезоэлектрическими материалами системы ЦТС в последнее время представляют высокий интерес пьезоматериалы системы  $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$  (PMN-PT), которые характеризуются высокими значениями электрофизических параметров и находят применение в многослойных конденсаторах с повышенными значениями диэлектрической проницаемости, а также в актюаторах прецизионного перемещения [1–7]. Однако, материалы этой системы имеют проблемы, возникающие в процессе изготовления (появление кристаллической структуры пирохлора при синтезе материала и др.) [8–10].

**Целью работы** была ликвидация указанных проблем при изготовлении, для этого был использован новый метод искрового плазменного спекания SPS. Метод SPS отличается сверхвысокой скоростью процесса спекания (десятки минут) при сниженных температурах (по сравнению с традиционным спеканием при атмосферном давлении на 100–300 °C), что способствует улучшению механических характеристик получаемых изделий. При таких условиях спекания подавляется рост зёрен керамики и формируется однородная, близкая к монофазной, микроструктура. **Задача работы** заключалась в применении метода SPS при спекании керамики PMN-PT, с целью повышения не только механических, но и электрофизических характеристик [11–20].

Для реализации процесса спекания методом SPS использовался пресс искрового плазменного спекания «SPS515S» (DR.Sinter-LABTM Fuji electronic industrial) (Япония). Снимки микроструктуры керамики PMN-PT полученной методом SPS при температурах 1050–1175 °C и результаты рентгенофазового анализа (РФА) представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

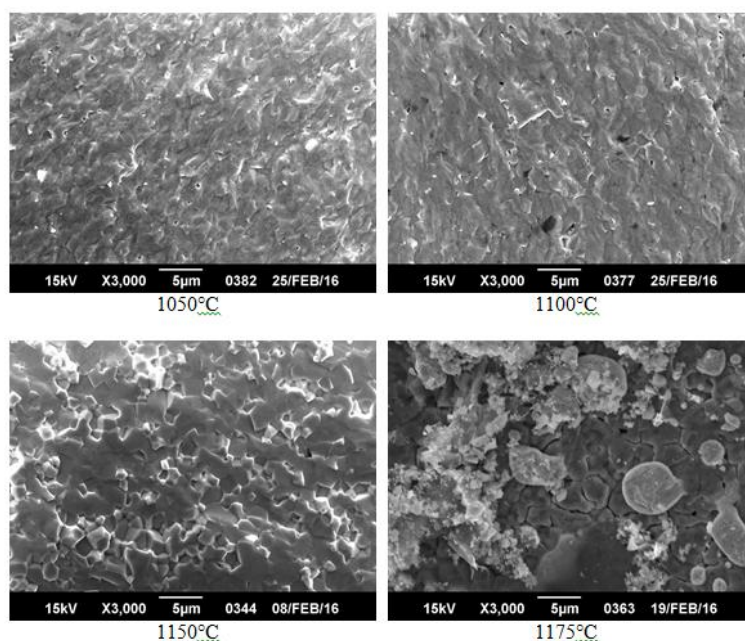


Рис. 1. Микроструктура керамики PMN-PT полученной методом SPS при температурах спекания 1050–1175 °С

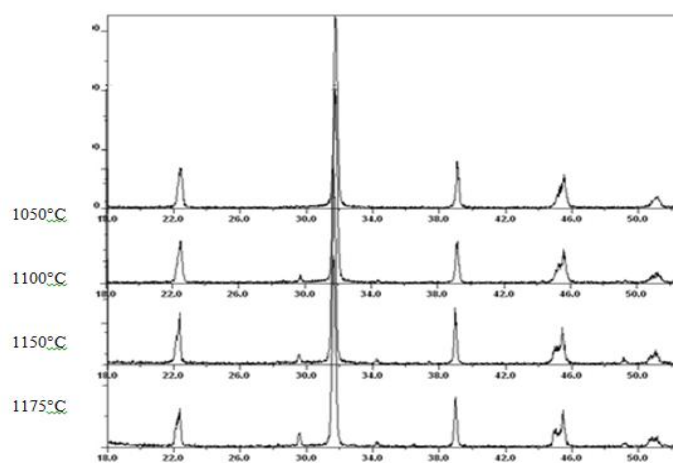


Рис. 2. Результаты РФА керамики PMN-PT полученной методом SPS

Спеченные керамические образцы цилиндрической формы обладали однородной структурой со средним размером зерен 2 мкм. Процесс спекания керамики PMN-PT сопровождался постоянной усадкой, которая прекращалась по достижении температуры 1000–1050 °С. В связи с этим было исследовано влияние одноосного механического давления на процесс спекания керамики. Было проведено спекание керамики PMN-PT при температуре 1050 °С с приложением одноосного механического давления 400, 500, 600 кг·с/см<sup>2</sup>.

Методом растровой электронной микроскопии не было замечено каких-либо различий в структуре керамики полученной при разных значениях одноосного давления. При проведении РФА также не было обнаружено существенных различий.

В результате исследования петель диэлектрического гистерезиса установлено, что повышение одноосного давления при спекании методом SPS способствует увеличению значений остаточной поляризации получаемой керамики при неизменных значениях коэрцитивного поля. Давление, прикладываемое к образцу в процессе спекания, влияет на формирование доменной структуры, отвечающей за величину спонтанной поляризации. Следовательно, повышение давления при спекании способствует повышению электрофизических параметров изготавливаемой керамики.

С целью сравнения электрофизических параметров керамики PMN-PT полученных методом SPS с керамикой полученной традиционным способом спекания, было проведено спекание керамики в камерной печи при атмосферном давлении, а также спекание керамики методом горячего прессования (ГП). Температура спекания в камерной печи составляла 1250 и 1300 °С, при горячем прессовании – 1180 °С (одноосное механическое давление при горячем прессовании составляло 250 кг·с/см<sup>2</sup>). Снимки микроструктуры и результаты РФА анализа керамики PMN-PT полученной при атмосферном давлении и методом горячего прессования представлены на рис. 3, 4 соответственно.

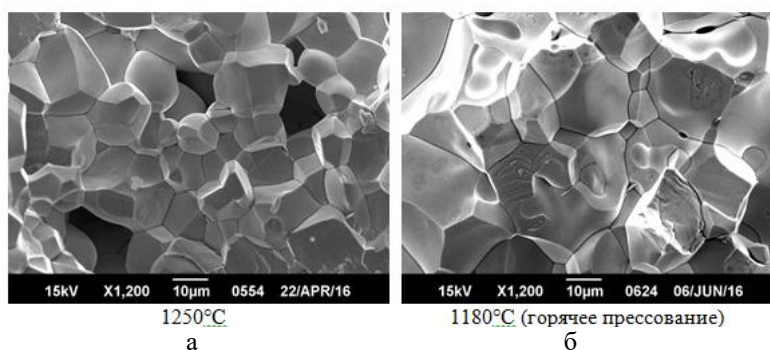


Рис. 3. Микроструктура керамики PMN-PT: а – полученной в камерной печи; б – полученной методом горячего прессования

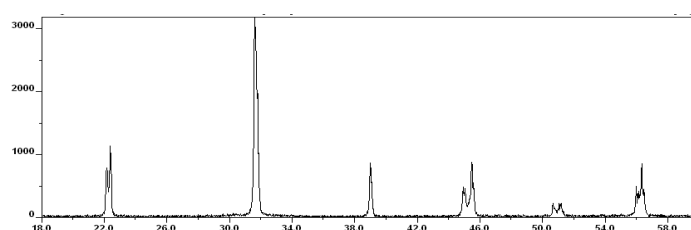


Рис. 4. Результаты РФА керамики PMN-PT полученной в камерной печи

Керамика PMN-PT спеченная при атмосферном давлении при температуре 1300 °С обладала низкими значениями плотности и пористой поверхностью, что свидетельствует о чрезмерно высокой температуре спекания. Такие керамические образцы характеризуются низкой механической прочностью и непригодны для дальнейшего использования. Керамические образцы спеченные при температуре 1250 °С имели высокие значения плотности и прочности. Размер зерен керамики составлял от 12 до 20 мкм.

Образцы полученные методом горячего прессования при температуре 1180 °С также обладали высокой плотностью и прочностью. Микроструктура горячепрессованных керамических образцов имела ярко выраженную полиразмерность, что свидетельствует о присутствии вторичной рекристаллизации в процессе спекания.

Керамические образцы прошедшие обжиг в печи SPS имели темный цвет, в отличие от керамики, полученной в камерной печи и методом горячего прессования, имеющей светло-желтый окрас. Темный окрас керамика приобретала в результате взаимодействия с графитом, применяемым в камере печи SPS в качестве матрицы – нагревателя. Прокаливание спеченной керамики при температуре 1000 °С восстанавливало цвет образца до светло-желтого.

Керамические образцы шлифовались на станке до размеров: диаметр 10 мм и высота 1 мм. Токопроводящие электроды наносились путём вжигания серебряносодержащей пасты. Поляризация керамических образцов осуществлялась на установке ПВС-2. Режимы поляризации были подобраны исходя из петель диэлектрического гистерезиса [24, 25].

Свойства полученных в результате пьезокерамических образцов PMN-PT представлены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства полученных образцов PMN-PT

Характеристики	Температура спекания керамики, °С					
	1050	1100	1150	1175	1250	1180 (ГП)
Пьезоэлектрический модуль $d_{33}$ , пКл/Н	310	347	420	510	460	480
Давление при спекании, кг·с/см <sup>2</sup>	400	400	400	400	Атмосферное давление	250
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ , %	0,8	0,5	0,4	0,6	0,5	0,7

**Заключение.** Пьезокерамические образцы системы PMN-PT, полученные методом искрового плазменного спекания, имели повышенные значения электрофизических параметров по сравнению с керамикой того же состава спеченной при атмосферном давлении в обычной камерной печи и керамикой полученной методом горячего прессования. Такое поведение пьезокерамического материала можно объяснить формированием однородной мелкозернистой микроструктуры керамики в процессе спекания, поскольку в методе искрового плазменного спекания сильно подавляется процесс роста зёрен. Метод горячего прессования также обеспечивает повышенные значения пьезоэлектрического модуля  $d_{33}$  по сравнению со спеканием в атмосферном давлении, но ниже, чем при методе SPS. Очевидно, спекание пьезокерамики системы PMN-PT методом искрового плазменного спекания требует дополнительных исследований, что позволит провести отработку режимов, обеспечивающих формирование оптимальной доменной структуры керамики. Представляется, что метод искрового плазменного спекания является перспективным не только для получения керамик PMN-PT, но и для других экспериментальных материалов на основе систем PZT, KNaNbO<sub>3</sub> и др.

Проведенные исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Высокие технологии».

Выражаем благодарность профессору Ли Г. Из Шанхайского Института Керамики Китайской академии наук за любезно предоставленный пьезокерамический материал PMN-PT.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Lim L.C.* Single crystal preparation techniques for manufacturing piezoelectric materials // *Advanced piezoelectric materials: science and technology*. – 2010. – P. 412-440.
2. *Jiwei Z., Bo S., Liangying Z., Xi Y.* Preparation and dielectric properties by sol-gel derived PMN-PT powder and ceramic // *Physical sciences and astronomy*. – 2000. – Vol. 64 (1). – P. 1-4.
3. *Yamada H.* Pressureless sintering of PMN-PT ceramics // *Journal of the european ceramic society*. – 1999. – Vol. 19 (6-7). – P. 1053-1056.
4. *Lente M.H., Zanin A.L., Assis S.B., Santos I.A., Garcia D., Eiras J.A.* Ferroelectric domain dynamics in PMN-PT ceramics // *Ferroelectrics*. Gordon and Breach Science Publishers. – 2003. – Vol. 296. – 149-155.
5. *Liou Y.C.* Stoichiometric perovskite PMN-PT ceramics produced by reaction-sintering process // *Materials science and engineering: B*. – 2003. – Vol. 103 (3). – P. 281-284.
6. *Guo H.K., Fu G., Tang X.G., Zhang J.X., Chen Z.X.* The dielectric relaxation relationship of PMN - PT ceramics // *Journal of physics: condensed matter*. – 1998. – No. 10 (18). – P. 297-302.
7. *Talanov M.V., Shilkina L.A., Reznichenko L.A.* Anomalies of the dielectric and electromechanical responses of multicomponent ceramics on the basis of PMN-PT near the morphotropic phase boundary // *Sensors and actuators a: physical*. – 2014. – Vol. 217. – P. 62-67.
8. *Zhao W., Ruan W., Zhao K., Zeng J., Li G., Wei X., Wang Y.* Electric-field induced strain and dielectric properties of  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  ceramics // *Ferroelectrics*. – 2015. – Vol. 488 (1). – P. 89-96.
9. *Lu S.G., Cai Z.H., Ouyang Y.X., Deng Y.M., Zhang S.J., Zhang Q.M.* Electrical field dependence of electrocaloric effect in relaxor ferroelectrics // *Ceramics international*. – 2015. – Vol. 41 (S1). – P. 15-18.
10. *La Saponara V., Horsley D.A., Lestari W.* Structural health monitoring of glass/epoxy composite plates using PZT and PMN-PT transducers // *Journal of engineering materials and technology*. Transactions of the American society of mechanical engineers. – 2011. – Vol. 133 (1). – P. 011-011.
11. *Zuo R., Granzow T., Lupascu D.C., Rödel J.* PMN-PT ceramics prepared by spark plasma sintering // *American Ceramic Society*. – 2007. – No. 90(4). – P. 1101-1106.
12. *Marder R., Caim R., Estournès C, Chevallier G.* Plasma in spark plasma sintering of ceramic particle compacts // *Scripta materialia*. – 2014. – Vol. 82. – P. 57-60.
13. *Munir Z.A., Anselmi-Tamburini U., Ohyanagi M.* The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method // *Journal of Materials Science*. – 2006. – Vol. 41. – P. 763-777.
14. *Ilyina A.M., Aleksandrova E.V., Grigoryev E.G., Olevsky E.A.* Influence of the electric current on the spark-plasma sintering processing // *Journal of Vector Science*. – 2013. – No. 3 (25). – P. 185-187.
15. *Федосова Н.А.* Керамический композиционный материал с углеродными нанотрубками, полученный по технологии искрового плазменного спекания // *Стекло и керамика*. – 2015. – № 1. – С. 14-17.
16. *Borrell A., Torrecillas R., Rocha V.G., Fernández A., Bonache V., Salvador M.D.* Effect of CNFS content on the tribological behaviour of spark plasma sintering ceramic-CNFS composites // *J. Wear*. – 2012. – P. 274-275.
17. *Анненков Ю. М., Акарачкин С. А., Иващутенко А.С.* Механизм искрового плазменного спекания керамики // *Бутлеровские сообщения*. – 2012. – № 30 (4). – С. 74-78.
18. *Токита М.* Тенденции в развитии систем искрового плазменного спекания и технологии // *Журнал общества специалистов порошковых технологий*. – 1993. – Т. 30 (11). – С. 790-804.
19. *Bernard-Granger G., Benameur N., Guizard C., Nygren M.* Influence of graphite contamination on the optical properties of transparent spinel obtained by spark plasma sintering // *Scripta materialia*. – 2009. – Vol. 60 (3). – P. 164-167.
20. *Nygren M., Shen Z.* On the preparation of bio-, nano- and structural ceramics and composites by spark plasma sintering // *Solid state sciences*. – 2003. – No. 5 (1). – P. 125-131.

## REFERENCES

1. Lim L.C. Single crystal preparation techniques for manufacturing piezoelectric materials, *Advanced piezoelectric materials: science and technology*, 2010, pp. 412-440.
2. Jiwei Z., Bo S., Liangying Z., Xi Y. Preparation and dielectric properties by sol-gel derived PMN-PT powder and ceramic, *Physical sciences and astronomy*, 2000, Vol. 64 (1), pp. 1-4
3. Yamada H. Pressureless sintering of PMN-PT ceramics, *Journal of the european ceramic society*, 1999, Vol. 19 (6-7), pp. 1053-1056.
4. Lente M.H., Zanin A.L., Assis S.B., Santos I.A., Garcia D., Eiras J.A. Ferroelectric domain dynamics in PMN-PT ceramics, *Ferroelectrics. Gordon and Breach Science Publishers*, 2003, Vol. 296, pp. 149-155.
5. Liou Y.C. Stoichiometric perovskite PMN-PT ceramics produced by reaction-sintering process, *Materials science and engineering: B*, 2003, Vol. 103 (3), pp. 281-284.
6. Guo H.K., Fu G., Tang X.G., Zhang J.X., Chen Z.X. The dielectric relaxation relationship of PMN - PT ceramics, *Journal of physics: condensed matter*, 1998, No. 10 (18), pp. 297-302.
7. Talanov M.V., Shilkina L.A., Reznichenko L.A. Anomalies of the dielectric and electromechanical responses of multicomponent ceramics on the basis of PMN-PT near the morphotropic phase boundary, *Sensors and actuators a: physical*, 2014, Vol. 217, pp. 62-67.
8. Zhao W., Ruan W., Zhao K., Zeng J., Li G., Wei X., Wang Y. Electric-field induced strain and dielectric properties of  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  ceramics, *Ferroelectrics*, 2015, Vol. 488 (1), pp. 89-96.
9. Lu S.G., Cai Z.H., Ouyang Y.X., Deng Y.M., Zhang S.J., Zhang Q.M. Electrical field dependence of electrocaloric effect in relaxor ferroelectrics, *Ceramics international*, 2015, Vol. 41 (S1), pp. 15-18.
10. La Saponara V., Horsley D.A., Lestari W. Structural health monitoring of glass/epoxy composite plates using PZT and PMN-PT transducers, *Journal of engineering materials and technology. Transactions of the American society of mechanical engineers*, 2011, Vol. 133 (1), pp. 011-011.
11. Zuo R., Granzow T., Lupascu D.C., Rödel J. PMN-PT ceramics prepared by spark plasma sintering, *American Ceramic Society*, 2007, No. 90 (4), pp. 1101-1106.
12. Marder R., Caim R., Estournès C, Chevallier G. Plasma in spark plasma sintering of ceramic particle compacts, *Scripta materialia*, 2014, Vol. 82, pp. 57-60.
13. Munir Z.A., Anselmi-Tamburini U., Ohyanagi M. The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method, *Journal of Materials Science*, 2006, Vol. 41, pp. 763-777.
14. Ilyina A.M., Aleksandrova E.V., Grigoryev E.G., Olevsky E.A. Influence of the electric current on the spark-plasma sintering processing, *Journal of Vector Science*, 2013, No. 3 (25), pp. 185-187.
15. Fedosova N.A. Keramicheskiy kompozitsionnyy material s uglevodnymi nanotrubkami, poluchennyy na tekhnologii iskrovogo plazmennogo spekaniya [Ceramic composite material with carbon nanotubes obtained by the technology of spark plasma sintering], *Steklo i keramika* [Glass and ceramics], 2015, № 1, pp. 14-17.
16. Borrell A., Torrecillas R., Rocha V.G., Fernández A., Bonache V., Salvador M.D. Effect of CNFS content on the tribological behaviour of spark plasma sintering ceramic-CNFS composites, *J. Wear*, 2012, pp. 274-275.
17. Amnenkov Yu.M., Akarachkin S.A., Ivashutenko A.S. Mekhanizm iskrovogo plazmennogo spekaniya keramiki [Mechanism of spark plasma sintering of ceramics], *Butlerovskie soobshcheniya* [Butlerov communications], 2012, No. 30 (4), pp. 74-78.
18. Tokita M. Tendentsii v razvitii sistem iskrovogo plazmennogo spekaniya i tekhnologii [Trends in the development of spark plasma sintering and technologies], *Zhurnal obshchestva spetsialistov poroshkovykh tekhnologiy* [Journal of the society of powder technology professionals], 1993, Vol. 30 (11), pp. 790-804.
19. Bernard-Granger G., Benameur N., Guizard C., Nygren M. Influence of graphite contamination on the optical properties of transparent spinel obtained by spark plasma sintering, *Scripta materialia*, 2009, Vol. 60 (3), pp. 164-167.
20. Nygren M., Shen Z. On the preparation of bio-, nano- and structural ceramics and composites by spark plasma sintering, *Solid state sciences*, 2003, No. 5 (1), pp. 125-131.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. Л.С. Лунин.

**Мараховский Михаил Алексеевич** – Научное конструкторско-технологическое бюро «Пьезоприбор» Южного федерального университета; e-mail: marmisha@mail.ru; 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10; тел.: +79045015431; к.т.н.; начальник сектора.

**Панич Александр Анатольевич** – директор-главный конструктор; д.т.н.; профессор.

**Marakhovskiy Mikhail Alexeevich** – Scientific-Design-Technological Department "PIEZOPRIBOR", Southern Federal University; e-mail: marmisha@mail.ru; 10, Mil'chakova street, Rostov-on-Don, 344090, Russia; phone: +79045015431; cand. of eng. sc.; head of sector.

**Panich Alexandr Anatol'evich** – director, chief designer; dr. of eng. sc.

УДК 621.396.67

DOI 10.23683/2311-3103-2017-6-249-258

**М.М. Мусаев, Н.Н. Кисель**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛА**

*В антенной технике применение метаматериалов считаются перспективным для создания новых классов СВЧ-устройств, излучателей и ФАР на их основе, позволяющих оптимизировать спектральные свойства излучения ФАР и управлять параметрами их диаграмм направленности. Уменьшение размеров антенн и увеличение направленности излучения при фиксированных размерах излучателей являются одной из важных задач антенной техники. Одним из способов решения этой задачи является использование слоев метаматериала, расположенных между излучателем и подложкой. В работе рассмотрена антенная линза на основе комбинированного метаматериала, представляющего структуру из разомкнутых кольцевых резонаторов, и плоскую структуру на базе рамочных элементов. Проведены численные и экспериментальные исследования и показана эффективность использования метаматериалов в качестве подложки антенн с целью улучшения направленных свойств антенны и уменьшения габаритов антенны в области реализации отрицательных значений диэлектрической или магнитной проницаемостей метаматериала. Вне рабочей полосы частот метаматериала его присутствие не оказывает влияния на характеристики антенны. Численно и экспериментально показано, что использование метаматериалов вблизи элементарных излучателей электромагнитных волн позволяет увеличить коэффициент усиления антенны и сузить диаграмму направленности при фиксированных поперечных размерах антенны. Показано, что использование подложки из комбинированного метаматериала на основе квадратных разомкнутых кольцевых резонаторов позволяет получить увеличение коэффициента усиления симметричной крестообразной антенны на 12 дБ в области реализации отрицательных значений диэлектрической проницаемости. Таким образом, слой метаматериала можно рассматривать как аналог антенной линзы, фокусирующей излучение антенны.*

*Метаматериал; антенная линза; разомкнутые кольцевые резонаторы; коэффициент усиления антенны.*

**M.M. Musayev, N.N. Kisel**

### **RESEARCH OF ANTENNA CHARACTERISTICS BASED ON METAMATERIAL**

*In the antenna technique, the use of metamaterials is considered promising for the creation of new classes of microwave devices, radiators and phased arrays based on them, which make it possible to optimize the spectral properties of phased-array radiation and control the parameters of their directional patterns. Reducing the size of antennas and increasing the directivity of radiation for fixed dimensions of radiators are one of the important tasks of antenna technology. One way to solve this problem is to use the metamaterial layers located between the emitter and the substrate. An antenna lens based on a combined metamaterial representing a structure of opening resonators and a flat structure based on frame elements is considered. Numerical and exper-*