Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 13

ТВЕРЬ 2021

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Издательство Тверского государственного университета, 2021. – Вып. 13. – 956 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2021

© Тверской государственной
университет, 2021

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ФЕРРИТА БАРИЯ И ТИТАНАТА БАРИЯ

О.В. Малышкина, Гр.С. Шишков, А.И. Иванова
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
170100, Россия, Тверь, ул. Желябова, 33
Olga.Malyshkina@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.740

Аннотация: В работе показано, что в результате спекания образцов композита титанат бария (80 объемных %) – феррит бария (20 объемных %) в фарфоровом тигле при температуре 1300°C возникает эвтектика. В результате сравнения свойств образцов, полученных при различных температурах спекания, установлено, что оптимальные свойства имеют образцы, спеченные при 1250°C. Проведено сравнение структуры и диэлектрических свойств образцов керамики титаната бария и композита титанат бария (80 объемных %) – феррит бария (20 объемных %), спеченных при температуре 1250°C. Показано, что добавление в состав титаната бария 20 % феррита бария повышает значение диэлектрической проницаемости, пьезоэлектрического коэффициента и пьезоэлектрического модуля d_{33} композита в 1,5–2 раза по сравнению с керамикой титаната бария, тогда как значение пьезоэлектрического модуля d_{31} остается без изменения. Введение в состав керамики титаната бария 20 % феррита бария достаточно для того, чтобы полученный композит имел магнитные характеристики, соответствующий чистому ферриту бария.

Ключевые слова: мультиферроик, феррит бария, титанат бария, магнито-электрический композит, структура пьезоэлектрической керамики.

1. Введение

Мультиферроики представляют собой соединения, в которых сосуществуют, по крайней мере, два из трех видов упорядочения: сегнетоэлектрическое, ферромагнитное, или сегнетоэластическое. В мультиферроиках приложение внешнего магнитного поля вызывает изменение поляризации и, наоборот, приложение электрического поля сопровождается изменением намагниченности [1]. Это свойство дает возможность применять мультиферроики для построения электрически управляемых СВЧ-устройств, акустической техники, высокочувствительных датчиков переменного магнитного поля и других технических устройств [2, 3].

Задача поиска оптимального магнитоэлектрического материала, сочетающего в себе высокие ферромагнитные и сегнетоэлектрические свойства, – остается актуальной. Эффективные композитные мультиферроики изготавливают из компонентов, которые не вступают в химическую реакцию, как в процессе, так и после спекания магнитного и пьезоэлектрического компонентов. Получаемые мультиферроики должны иметь хорошие ферромагнитные и сегнетоэлектрические свойства [3, 4].

Для изготовления композитных мультиферроиков, пригодных для

практических задач магнитоэлектроники, требуются мультиферроики с большими значениями намагниченности и коэрцитивной силы. С этой точки зрения представляют интерес композитные мультиферроики, созданные на основе гексагональных ферритов, активно проявляющие мультиферроидные свойства при комнатной температуре [3-7].

2. Постановка задачи

Для практического применения наиболее перспективными являются композиционные материалы, в которых реализовано объемное сочетание сегнетоактивных и магнитных материалов. Создание таких композитов в настоящее время осуществляется в двух направлениях: слоистые композиты, представляющие собой образцы с чередованием слоев из сегнетоэлектрического и магнитного материалов [8, 9], и полимерные магнитные вещества, в состав которых входит сегнетоэлектрическая керамика [10]. Одним из наиболее распространенных керамических сегнетоэлектриков, не содержащих свинец, является титанат бария. Согласно [11] оптимальная температура получения данного материала 1350 °С. В качестве магнитной составляющей, нами был выбран феррит бария, обладающий магнитными свойствами в широком температурном интервале [7]. В то же время, уже первые исследования показали, что в результате спекания образцов композита феррит бария $BaFe$ (20 %) – титанат бария (80 %) при температуре 1300 °С и выше имеет место эвтектика. Железо из феррита бария и алюминий из фарфорового тигля, в состав которого входит смесь каолина ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), в присутствии титаната бария образуют эвтектику, вследствие чего образцы и тигель «склеиваются», теряют жёсткость и начинают «стекать» (см. рис. 1).

Рис. 1. РЭМ изображения структуры образцов композита $BaTiO_3$ и $BaFe$ на сколе (а) и на поверхности (б), полученных при температуре спекания 1300 °С. Масштабная метка – 50 мкм.

В связи с этим, нами ранее [12] были получены и исследованы

образцы композита керамики $BaTiO_3$ (материал получен твердофазным синтезом при 1350°C) и $BaFe$, спеченные при температуре 1100°C . Материалы $BaTiO_3$ и $BaFe$ были измельчены в ступке, смешаны в объемных процентах в соотношении 80–20, затем спрессованы под давлением 5 атмосфер. Диэлектрические исследования полученных образцов показали [12] слабо выраженные сегнетоэлектрические свойства, что, по всей видимости, является следствием низкой температуры спекания.

Целью настоящей работы являлось определение оптимальной температуры спекания образцов композита $BaTiO_3 - BaFe$. Основной задачей было с одной стороны, избежать эвтектики, с другой получить материал с хорошими сегнетоэлектрическими и магнитными свойствами.

3. Экспериментальная часть и описание результатов

Для решения поставленной задачи, нами была определена минимальная температура спекания керамики титаната бария, при которой образцы обладают хорошими сегнетоэлектрическими свойствами. Под хорошим сегнетоэлектрическими свойствами мы понимаем высокие значения пьезоэлектрического и пьроэлектрического коэффициентов и большую величину диэлектрической проницаемости как в точке Кюри, так и при комнатной температуре.

Твердофазный синтез исходных керамик $BaFe$ и $BaTiO_3$ проводился по стандартным технологиям [7, 11, 13].

Образцы керамики $BaTiO_3$ спекались в муфельной печи при температурах 1150, 1200, 1250, 1300 и 1350°C . Образцы композита $BaFe - BaTiO_3$ спекались при температуре 1250°C . Исходные компоненты брались в процентном соотношении: $BaFe$ – 20 объемных %, $BaTiO_3$ – 80 объемных %. Все заготовки имели диаметр 10,4 мм, после спекания размер образцов составил 8,5–9,1 мм. Изменение размеров связано с уплотнением материала в процессе спекания. Явной зависимости от температуры спекания выявлено не было.

Исследование пьезоэлектрического эффекта методом резонанса-антирезонанса и остаточной поляризации по петлям диэлектрического гистерезиса [14] образцов керамики титаната бария, спеченных при разных температурах показали, что достаточные для практического применения величины пьезоэлектрического модуля ($d_{31} > 30 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н; $d_{33} > 190 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н) и спонтанную поляризацию ($> 0,02$ Кл/м²) имеют образцы, спеченные при температурах 1250°C и выше.

Исследования структуры на растровом электронном микроскопе JEOL 6510LV ЦКП ТвГУ выявили принципиальное различие в структуре и

размере зерен керамики титаната бария, спеченного при температурах ниже и выше 1250 °С (см. рис. 2). В первом случае наблюдалось два типа зерен – первый представляет собой слипшиеся частицы, из которых прессовался образец (размером 0,5–2 мкм); второй – зерна в процессе рекристаллизации (размером 5–15 мкм). Во втором – только зерна в процессе рекристаллизации (размером 10–35 мкм).

Рис. 2. РЭМ изображения структуры образцов $BaTiO_3$, полученных при температурах спекания 1150 (а), 1200 (б), 1250 (в), 1300 (г) и 1350 (д) °С и композита $BaTiO_3 - BaFe$, спеченного при 1250 °С (е). Масштабная метка: б – д 10 мкм; е – 5 мкм.

Анализ зерен второго типа показал резкое увеличение размера зерна r в интервале температур спекания 1250–1300 °С (см. рис. 3). В тоже время у образцов, спеченных при температуре 1250 °С (см. рис. 2 в), отсутствуют конгломераты сырьевой заготовки, что позволяет предположить, что процессы рекристаллизации идут уже по всему объему образца. Это особенно важно для получения композита $BaTiO_3 - BaFe$, так как температура спекания 1300 °С для него невозможна в связи с эвтектикой. Поскольку образцы титаната бария спеченные при 1250 °С, как было показано выше, имеют неплохие сегнетоэлектрические характеристики, для получения композита была выбрана именно эта температура.

Рис. 3. Зависимость среднего размера зерен от температуры спекания образцов $BaTiO_3$.

Исследование структуры композита $BaTiO_3 - BaFe$ на растровом электронном микроскопе (РЭМ) с помощью отраженных электронов позволило выявить композиционный (по элементному составу) контраст (см. рис. 2 е). У образца композита, как и у керамики чистого титаната бария, имеется два типа зерен. Но анализ элементного состава, проведенный в аналитическом комплексе РЭМ, оснащенном рентгеновским энергодисперсионным спектрометром Oxford INCA Energy 350 Oxford Instruments, позволил предположить, что в данном случае малые зерна представляют собой не конгломераты сырьевой заготовки. Об этом свидетельствует различие элементного состава в крупных и мелких зернах (см. рис. 4). При этом мелкие зерна наблюдаются с различным композиционным контрастом, что также свидетельствует о различии в составе. Интересно отметить, что темные области (состоящие только из мелких зерен) содержат незначительное количество атомов титана, следовательно, в них преобладает феррит бария. В светлых областях железо находится в незначительном количестве или отсутствует. Это свидетельствует о том, что нами получен не твердый раствор титаната – феррита бария, а именно композит $BaTiO_3 - BaFe$.

Для проверки наличия у образцов композита $BaTiO_3 - BaFe$ сегнетоэлектрических свойств были проведены исследования температурной зависимости диэлектрической проницаемости, измерены пьезоэлектрический модуль (методом резонанса–анирезонанса [14]) и пьезоэлектрический коэффициент (динамическим методом [14]).

Спектр	O	Ti	Fe	Ba
Спектр 1	65,6	9,6	13,2	11,6
Спектр 2	65,4	15,9	0,8	17,9
Спектр 3	66,4	1,1	29,3	3,2
Спектр 4	65,8	15,4	2,1	16,7

Спектр	O	Ti	Fe	Ba
Спектр 1	48,3	1,8	45,0	4,9
Спектр 2	68,0	1,4	27,6	3,0
Спектр 3	68,5	1,6	26,7	3,2
Спектр 4	74,0	1,2	22,2	2,6
Спектр 5	64,3	17,1	0,3	18,3
Спектр 6	66,8	16,0	0,0	17,2
Спектр 7	65,4	16,6	0,4	17,6
Спектр 8	65,7	16,7	0,1	17,5

Рис. 4. Результаты измерений молярных концентраций элементов композита $BaTiO_3 - BaFe$ и области, по которым брался спектр.

Как показали исследования, добавление в керамику титаната бария 20% феррита бария приводит к увеличению диэлектрической проницаемости почти в два раза, как при комнатной температуре, так и в сегнетоэлектрической точке Кюри. Сам максимум при этом размывается, сдвигаясь в сторону более высоких температур на 20 градусов (см. рис. 5).

Сравнение значений пьезоэлектрического коэффициента γ и пьезоэлектрических модулей d_{31} и d_{33} показало, что введение в состав керамики титаната бария 20% феррита бария привело к увеличению этих коэффициентов (см. Таблицу 1).

Рис. 5. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости образцов $BaTiO_3$ (кривая 1) и композита $BaTiO_3 - BaFe$ (кривая 2), полученных при температуре 1250°C.

Таблица 1. Диэлектрические характеристики образцов керамики $BaTiO_3$ и композита $BaTiO_3 - BaFe$, спеченных при температуре 1250°C

Материал	ϵ	d_{31} , Кл/Н	d_{33} , Кл/Н	γ , 10^{-4} Кл/м ² К
керамика $BaTiO_3$	1200	$32 \cdot 10^{-12}$	$191 \cdot 10^{-12}$	0,23
композит $BaTiO_3 - BaFe$	2100	$34 \cdot 10^{-12}$	$302 \cdot 10^{-12}$	0,7

Для проверки магнитных свойств нами были проведены исследования удельной магнитной намагниченности на вибрационном магнитометре. Петли удельной намагниченности для образцов композита $BaTiO_3 - BaFe$ предварительно поляризованного в постоянном электрическом поле 220 В/мм, и без предварительной поляризации представлены на рис. 6.

Рис. 6. Зависимость удельной намагниченности от магнитной индукции для образцов композита $BaTiO_3 - BaFe$, не подвергнутого внешнему воздействию (кривая 1) и после поляризации в постоянном электрическом поле 220 В/мм (кривая 2).

Величина коэрцитивной силы удельная намагниченность не зависят от электрической предыстории образца. Значение коэрцитивной силы, полученной в эксперименте, совпадает с соответствующим значением для чистой керамики феррита бария.

4. Заключение

В результате проведенных исследований установлена оптимальная температура синтеза композита $BaTiO_3-BaFe$, составляющая 1250°C . Необходимость понижения температуры спекания относительно оптимальной температуры получения керамики титаната бария, вызвана невозможностью синтезировать композит $BaTiO_3-BaFe$ при температуре 1300°C , из-за возникновения эвтектики.

Показано, что полученный материал не только обладает сегнетоэлектрическими и магнитными свойствами, но можно с уверенностью сказать, что даже вхождение в композит всего 20 % феррита бария полностью сохраняет магнитные свойства исходной керамики феррита бария. Пьезоэлектрический модуль d_{31} , полученного в работе композита, равен соответствующему пьезоэлектрическому модулю исходной керамики титаната бария, тогда как пьезоэлектрический модуль d_{33} , пьезоэлектрический коэффициент и диэлектрическая проницаемость в 1,5–2 раза превышают исходные значения.

Возникновение эвтектики в присутствии титана между каолином, входящим в состав высокотемпературного тигля и ферритом бария позволяет создать простую технологию нанесения специальных покрытий сплавов на основе алюминидов железа для увеличения жаростойкости, твердости и коррозионной стойкости изделий.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования Тверского государственного университета.

Библиографический список:

1. **Смоленский, Г.А.** Сегнетомагнетики / Г.А. Смоленский, И.Е. Чупис // Успехи физических наук. – 1982. – Т. 137. – Вып. 7. – С. 415-448. DOI: 10.3367/UFNr.0137.198207b.0415.
2. **Звездин, А.К.** Неоднородное магнитоэлектрическое взаимодействие в мультиферроиках и вызванные им новые физические эффекты / А.К. Звездин, А.П. Пятаков // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179. – Вып. 8. – С. 897-904. DOI: 10.3367/UFNe.0179.200908i.0897.
3. **Kleemann, W.** Multiferroic and magnetoelectric nanocomposites for data processing / W. Kleemann // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2017. – V. 50. – № 22. – Art. № 223001. – 13 p. DOI: 10.1088/1361-6463/aa6c04.
4. **Пятаков, А.П.** Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики / А.П. Пятаков, А.К. Звездин // Успехи физических наук. – 2012. – Т. 182. – Вып. 6. – С. 593-620. DOI: 10.3367/UFNe.0182.201206b.0593.
5. **Ortega, N.** Multifunctional magnetoelectric materials for device applications / N. Ortega, A. Kumar, J.F. Scott, R.S. Katiyar // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2015. – Vol. 27. – № 50. – Art. № 504002. – 23 p. DOI: 10.1088/0953-8984/27/50/504002.

6. **Vopson, M.** Fundamentals of multiferroic materials and their possible applications / M. Vopson // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. – 2015. – V. 40. – I. 4. – P. 223-250. DOI: 10.1080/10408436.2014.992584.
7. **Sloccari, G.** Phase equilibrium in the subsystem $BaO \cdot Fe_2O_3 - BaO \cdot 6Fe_2O_3$ / G. Sloccari // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1973. – V. 56. I. 9. P. 489-490. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1973.tb12531.x.
8. **Karpenkov, D.Y.** Multilayered ceramic heterostructures of lead zirconate titanate and nickel-zinc ferrite for magnetoelectric sensor elements. / D.Y. Karpenkov, A.A. Bogomolov, A.V. Solnyshkin et al. // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2017. – V. 266. – P. 242-246. DOI: 10.1016/j.sna.2017.09.011.
9. **Grechishkin, R.M.** Magnetoelectric effect in metglas/piezoelectric macrofiber composites / R.M. Grechishkin, I.A. Kaplunov, S.E. Ilyashenko et al. // *Ferroelectrics*. – 2011. – V. 424. – I. 1. – P. 78-85. DOI: 10.1080/00150193.2011.623939.
10. **Makarova, L.A.** Elastically coupled ferromagnetic and ferroelectric microparticles: new multiferroic materials based on polymer, $NbFeB$ and PZT particles. / L.A. Makarova, Yu.A. Alekhina, N.S. Perov et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2017. – V. 470. – P. 89-92. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.11.121.
11. **Окадзаки, К.** Технология керамических диэлектриков / К. Окадзаки; пер. с японского М.М. Богачихина, Л.Р. Зайонца. – М.: Энергия, 1976. – 336 с.
12. **Malyshkina, O.V.** Multiferroic ceramics based on barium titanate and barium ferrite. / O.V. Malyshkina, G.S. Shishkov, A.I. Ivanova, Y.A. Malyshkin, Y.A. Alexina // *Ferroelectrics*. – 2020. – V. 569. – I. 1. – P. 215-221. DOI: 10.1080/00150193.2020.1822679.
13. *Magnetic oxides and composites* // In Series: Materials Research Foundations. – V. 31; ed. by R.B. Jotania, S.H. Mahmood. – Millersville, PA 17551, USA: Materials Research Forum LLC, 2018. – 274 p.
14. **Головнин, В.А.** Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов / В.А. Головнин, И.А. Каплунов, Б.Б. Педько, О.В. Малышкина, А.А. Мовчикова. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2013. – 272 с.
15. **Чернякова, К.В.** Структура и магнитные свойства гексагонального феррита бария / К.В. Чернякова, В.В. Паньков, М.И. Ивановская, В.А. Ломоносов // *Вестник БГУ*. – 2008. – Сер. 2. – № 1. – С. 9-13.

References:

1. Smolenskii G.A., Chupis I.E. Ferroelectromagnets, *Physics-Uspekhi*, 1982, vol. 25, issue 7, pp. 475-493. DOI: 10.1070/PU1982v025n07ABEH004570.
2. Zvezdin A.K., Pyatakov A.P. Inhomogeneous magnetoelectric interaction in multiferroics and related new physical effects, *Physics-Uspekhi*, 2009, vol. 179, issue 8, pp. 845-851. DOI: 10.3367/UFNe.0179.200908i.0897.
3. Kleemann W. Multiferroic and magnetoelectric nanocomposites for data processing, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, vol. 50, no. 22, art. no. 223001, 13 p. DOI: 10.1088/1361-6463/aa6c04.
4. Pyatakov A.P., Zvezdin A.K. Magnetoelectric and multiferroic media, *Physics-Uspekhi*, 2012, vol. 182, issue 6, pp. 557-581. DOI: 10.3367/UFNe.0182.201206b.0593.
5. Ortega N., Kumar A., Scott J.F., Katiyar R.S. Multifunctional magnetoelectric materials for device applications, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2015, vol. 27, no. 50, art. no. 504002. 23 p. DOI: 10.1088/0953-8984/27/50/504002.
6. Vopson M. Fundamentals of multiferroic materials and their possible applications, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2015, vol. 40, issue 4, pp. 223-250. DOI: 10.1080/10408436.2014.992584.
7. Sloccari G. Phase equilibrium in the subsystem $BaO \cdot Fe_2O_3 - BaO \cdot 6Fe_2O_3$, *Journal of the American Ceramic Society*, 1973, vol. 56, issue 9, pp. 489-490. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1973.tb12531.x.
8. Karpenkov D.Y., Bogomolov A.A., Solnyshkin A.V. et al. Multilayered ceramic heterostructures of lead zirconate titanate and nickel-zinc ferrite for magnetoelectric sensor elements, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, vol. 266, pp. 242-246. DOI: 10.1016/j.sna.2017.09.011.
9. Grechishkin R.M., Kaplunov I.A., Ilyashenko S.E. et al. Magnetoelectric effect in metglas/piezoelectric macrofiber composites, *Ferroelectrics*, 2011, vol. 424, issue 1, pp. 78-85. DOI: 10.1080/00150193.2011.623939.
10. Makarova L.A., Alekhina Yu.A., Perov N.S. et al. Elastically coupled ferromagnetic and ferroelectric microparticles: new multiferroic materials based on polymer, $NbFeB$ and PZT particles, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 470, pp. 89-92. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.11.121.
11. Okazaki K. *Ceramic engineering for dielectrics*. Tokyo: Gakken-sha, Publishing Co., Ltd., 1969, 532 p. (In Japanese) [Okadzaki K. *Tekhnologiya keramicheskikh dielektrikov* [Ceramic dielectric technology], transl. by M.M. Bogachikhina, L.R. Zajontsa. Moscow, Ehnergiya Publ., 1976, 336 p. (In Russian)].
12. Malyshkina O.V., Shishkov G.S., Ivanova A.I., Malyshkin Y.A., Alexina Y.A. Multiferroic ceramics based

on barium titanate and barium ferrite., *Ferroelectrics*, 2020, vol. 569, issue 1, pp. 215-221. DOI: 10.1080/00150193.2020.1822679.

13. Magnetic oxides and composites, *Materials Research Foundations*, vol. 31, ed. by R.B. Jotania, S.H. Mahmood. Millersville, PA 17551, USA, Materials Research Forum LLC, 2018, 274 p.

14. Golovnin V.A., Kaplunov I.A., Ped'ko B.B., Malyshkina O.V., Movchikova A.A. *Fizicheskie osnovy, metody issledovaniya i prakticheskoe primeneniye p'ezomaterialov* [Physical foundations, research methods and practical application of piezomaterials]. – Moscow, TEKHNOSFERA Publ., 2013. – 272 p. (In Russian).

15. Chernyakova K. V., Pankov V.V., Ivanovskaya M.I., Lomonosov V.A. *Struktura i magnitnyye svoystva geksagonalnogo ferrita bariya* [Structure and magnetic properties of hexagonal barium ferrite], *Vestnik BGU [Bulletin of BSU]*, 2008, ser. 2, no. 1, pp. 9-13. (In Russian).

Original paper

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGY FOR PRODUCING A COMPOSITE BASED ON BARIUM FERRITE AND BARIUM TITANATE

O.V. Malyshkina, Gr.S. Shishkov, A.I. Ivanova

Tver State University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.740

Abstract: It is shown in the work that as a result of sintering of composite samples of barium titanate (80 vol. %) – barium ferrite (20 vol. %) in a porcelain crucible at a temperature of 1300 °C, a eutectic appears. As a result of comparing the properties of the samples obtained at different sintering temperatures, it was found that the samples sintered at 1250 °C have optimal properties. The structure and dielectric properties of barium titanate ceramic samples and barium titanate (80 vol. %) – barium ferrite (20 vol. %) composite sintered at a temperature of 1250 °C are compared. It has been shown that the addition of 20% barium ferrite to the composition of barium titanate increases the dielectric constant, pyroelectric coefficient, and piezoelectric modulus d_{33} of the composite of 1.5–2 times compared to barium titanate ceramics, while the value of the piezoelectric modulus d_{31} remains unchanged. The introduction of 20 % barium ferrite into the barium titanate ceramics is sufficient for the resulting composite to have magnetic characteristics corresponding to pure barium ferrite.

Keywords: *multiferroic, barium ferrite, barium titanate, magneto-electric composite, piezoelectric ceramic structure.*

*Малышкина Ольга Витальевна – д.ф.-м.н., профессор, начальник отдела диссертационных советов и докторантуры управления научных исследований ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
Шишков Григорий Сергеевич – аспирант 3 года обучения, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»*

Иванова Александра Ивановна – к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Olga V. Malyshkina – Dr. Sc., Full Professor, Head of the Department of Dissertation Councils and Doctorate Studies, Scientific Research Department, Tver State University

Gregori S. Shishkov – 3rd year postgraduate student, Tver State University

Alexandra I. Ivanova – Ph. D., Docent, Applied Physic Department, Tver State University

Поступила в редакцию/received: 11.08.2021; после рецензирования/revised: 27.08.2021; принята/accepted 07.09.2021.