

## СТРУКТУРА И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОИСТОГО КОМПОЗИТА ТИТАНАТ БАРИЯ – ФЕРРИТ 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/2022.14.194

**Аннотация:** В работе представлены результаты исследования влияния постоянного магнитного поля на дисперсию комплексной диэлектрической проницаемости слоистого композита (связность 2-2) на основе титаната бария – феррита бария. Показано, что при изготовлении магнитоэлектрического композита титанат бария – феррит бария со связность 2-2 появляется сильная диффузия железа в слой керамики титаната бария на границе раздела двух материалов. Обнаружено, что железо проникает равномерно, со случайными отклонениями и экспоненциального спада по мере вхождения железа в титанат бария не наблюдается. Установлено, что постоянное магнитное поле не влияет на диэлектрические характеристики в переменном электрическом поле на частотах выше 1600 Гц. При более низких частотах, отжиг в параэлектрической фазе увеличивает сопротивление образца, а последующее воздействие постоянного магнитного поля приводит к его уменьшению. Выявлено, что изменение типа связности магнитоэлектрического композита от 0-3 к 2-2 добавляет дополнительные, более мелкие, резонансные и антирезонансные пики при исследовании пьезоэлектрических свойств методом резонанса – антирезонанса. При этом образцы имеют достаточные для практического применения величины пьезоэлектрического модуля ( $d_{31} > 40 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н;  $d_{33} > 120 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н).

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

### 1. Введение

В современном мире твердотельной электроники всё чаще требуются материалы с заданными свойствами, обеспечивающие компактность, надёжность и точную настройку рабочих параметров. Достаточно хорошо показывают себя в этой роли мультиферроики, сочетая в себе минимум два из трех видов ферроупорядочения: сегнетоэлектрическое, ферромагнитное, или сегнетоэластическое. Меняя внешнее магнитное поле можно менять поляризацию и, наоборот, изменение внешнего электрического поля может сопровождаться изменением намагниченности [1]. Области применения этого свойства огромны: от электрически управляемых СВЧ-устройств и высокочувствительных датчиков переменного магнитного поля до акустической техники [2, 3].

Практически все сегнетомагнетики – синтезированные соединения. При этом, их параметров недостаточно для обеспечения всех текущих задач магнитоэлектроники. Единственным решением становится изготовление композитных мультиферроиков, сочетающих в себе хорошие ферромагнитные и сегнетоэлектрические свойства [3, 4].

Для решения большинства практических задач необходимы 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].

Также, немаловажным фактором является выбор связности структуры мультиферроидного композита. Всё больше исследований показывают преимущества двухслойных и многослойных композитов перед гомогенными структурами. [6]

## **2. Постановка задачи**

Практически значимыми становятся композитные материалы, сочетающие в себе сегнетоэлектрические и магнитные компоненты. Преимущественно исследуются слоистые композиты (связность 2-2), в которых реализовано чередование двух и более слоёв из сегнетоэлектрического и магнитного материалов [8, 9], и гомогенные структуры, в которых магнитные сегнетоэлектрическая керамика равномерно распределены в объёме [10]. Исследования композита со связностью 0-3 не показали ожидаемой связи между магнитной и электрической подсистемами. В следствие чего стало интересно изготовить и проанализировать структуру и свойства слоистых образцов.

В качестве сегнетоэлектрической составляющей была бесвинцовая керамика титаната бария [11, 12]. На роль магнитной компоненты был выбран феррит бария, обладающий магнитными свойствами в широком температурном интервале [7]. Образцы композитов были получены методом твердофазного синтеза. Твердофазный синтез исходных керамик проводился по стандартным технологиям [7, 11, 13]. В пресс-форме формировался диск из спрессованного порошка титаната бария (80 масс.%) под давлением  $10^9$  Па, после чего на его поверхность досыпался порошок феррита бария (20 масс.%) и осуществлялось прессование под давлением  $2,5 \cdot 10^9$  Па. Затем, согласно [14], осуществлялось спекание при температуре  $1250^\circ\text{C}$ .

Изначально были предприняты попытки изготовления композитов по данной технологии с диаметром 10 мм. Однако, в ходе спекания и остывания все образцы сильно деформировались и расслаивались, что можно объяснить тепловыми расширениями двух разнородных компонент. В связи с этим, пришлось уменьшить диаметр пресс-формы до 5 мм. При таком размере сил молекулярного взаимодействия оказалось достаточно для преодоления внутренних напряжений на границе раздела двух составов при нагреве и остывании, в результате чего образцы сохранили

целостность и получили достаточную прочность для проведения дальнейших исследований (см. рис. 1 а).

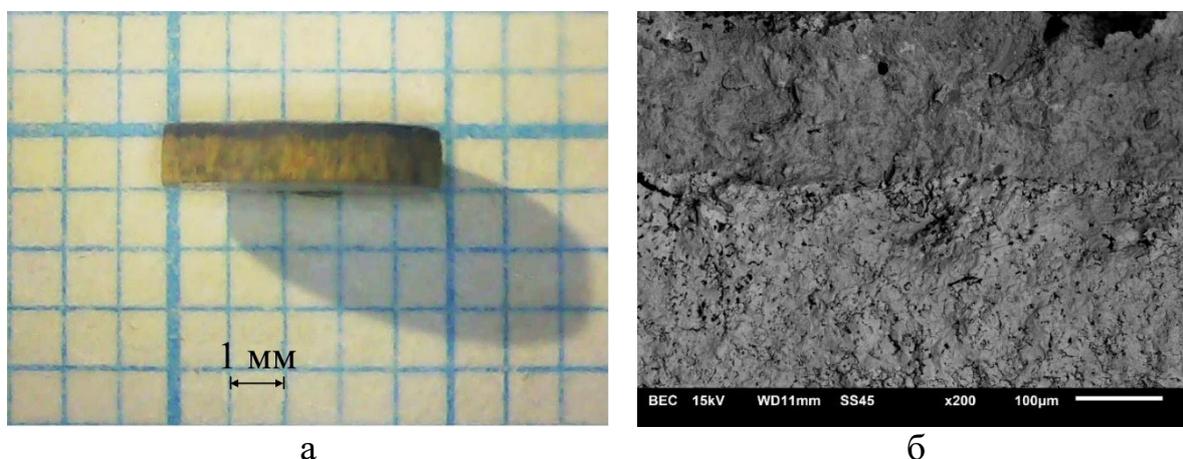


Рис. 1. Образец композита титанат бария – феррит бария диаметром 5 мм, вид с торца (а), РЭМ изображение на сколе (б) (масштабная метка – 100 мкм).

Целью настоящей работы являлось исследование формирования структуры слоистого композита титанат бария – феррит бария, выявление связи магнитной и электрических подсистем, и влияния этого взаимодействия на диэлектрические свойства.

### **3. Экспериментальная часть и описание результатов**

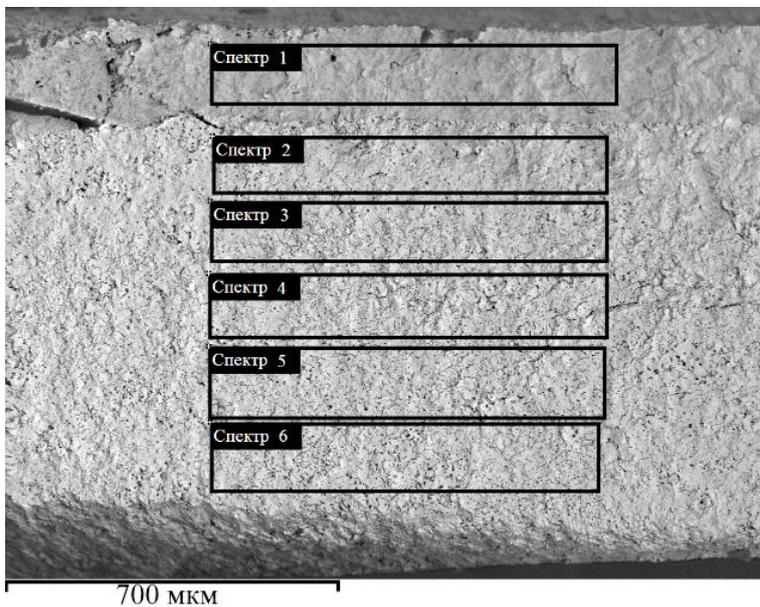
Исследования структуры и элементного состава проводились на растровом электронном микроскопе JEOL 6510LV. Элементный состав определялся методом энерго–дисперсионного анализа (Oxford INCA Energy 350 Oxford Instruments) в режиме отраженных электронов (BEC), позволяющем выявлять композиционный контраст. На изображении бокового скола четко прослеживается граница раздела феррит бария – титанат бария (см. рис. 1 б).

В ходе эксперимента нами были получены и обработаны спектры, снятые с боковой поверхности (сколов) образцов по тонким прямоугольным областям параллельным границы раздела титанат бария – феррит бария. Результаты представлены на рис. 2.

На рис. 2 а представлены шесть спектров по всей толщине образца. В таком грубом приближении можно увидеть, что диффузия железа в керамику титаната бария заканчивается на спектре 3 и в 4-м и 5-м спектрах его уже не обнаружено. Т.е проникновение железа в керамику титаната бария осуществляется на глубину порядка 300 мкм. Более подробный анализ на границе раздела титанат бария – феррит бария (см. рис. 2 б), показал, что железо проникает равномерно по глубине (см. спектры 11-22). Экспоненциального спада по мере вхождения железа в титанат бария не

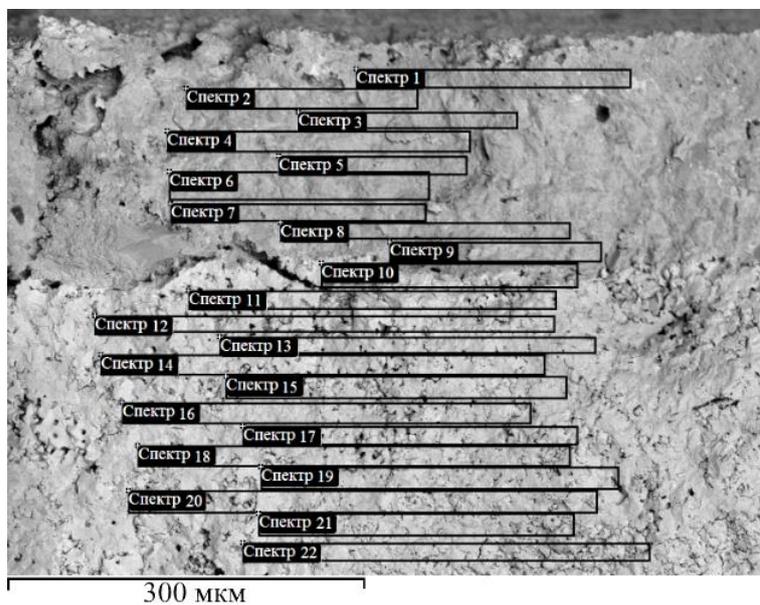
наблюдается. Среднее значение проникновения железа составляет 1,8 мол.% при его присутствии в феррите бария 30 мол.%. В тоже время, случайный разброс значений, определенный по стандартному отклонению, достаточно большой и составляет 0,7.

Спектр	O	Ti	Fe	Ba
Спектр 1	61,9	1,9	29,5	6,7
Спектр 2	63,6	16,9	1,7	17,8
Спектр 3	62,5	17,5	1,4	18,7
Спектр 4	62,9	18,6		18,5
Спектр 5	63,1	18,3		18,6
Спектр 6	63,7	17,8		18,5



а

Спектр	O	Ti	Fe	Ba
Спектр 1	62,2	2,3	30,4	5,1
Спектр 2	60,2	2,0	30,3	7,5
Спектр 3	61,3	2,0	28,9	7,8
Спектр 4	60,4	2,1	30,3	7,2
Спектр 5	60,0	2,5	30,2	7,3
Спектр 6	58,7	2,1	31,5	7,7
Спектр 7	59,8	3,0	29,8	7,3
Спектр 8	61,2	2,2	29,3	7,3
Спектр 9	62,6	2,0	29,0	6,4
Спектр 10	65,1	10,7	12,0	12,2
Спектр 11	63,3	16,7	1,8	18,2
Спектр 12	63,7	17,5	1,3	17,6
Спектр 13	64,6	16,9	1,5	17,0
Спектр 14	63,6	18,0	1,1	17,3
Спектр 15	62,5	18,3	1,2	18,0
Спектр 16	63,5	16,9	3,0	16,6
Спектр 17	62,1	17,6	1,8	18,5
Спектр 18	61,8	16,9	3,4	17,9
Спектр 19	62,4	16,8	2,3	18,5
Спектр 20	62,0	17,7	2,0	18,4
Спектр 21	59,7	18,7	1,4	20,2
Спектр 22	61,4	17,8	1,4	19,4



б

Рис. 2. Результаты измерений молярных концентраций элементов композита титанат бария – феррит бария в областях, по которым брался спектр для всего образца (а) и границы раздела двух материалов (б).

Аналогичная ситуация прослеживается с вхождением титана в слой феррита бария (см. рис. 2 б, спектры 1-9). Его среднее значение проникновения составляет 2,2 мол.% при присутствии в титанате бария 17,5 мол.%.

Исследование дисперсионных зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости этих составов проводилось в диапазоне частот от 1 Гц до 15 МГц при температурах от 30° до 160°С (температура Кюри керамики титаната бария 130°С). Измерения осуществлялись LCR методом с использованием фазочувствительного измерителя Вектор-175 (Newtons4th Ltd).

На рис. 3 а представлены частотные зависимости диэлектрической проницаемости до (кривые 1-3) и после (кривые 4-6) отжига образца; до воздействия постоянным магнитом 250 мТл (кривые 1, 4), в процессе воздействия (расположение образца ребром к плоскости магнита (кривые 2, 5)) и после воздействия (кривые 3, 6).

На частоте электрического поля 1600 Гц и выше диэлектрическая проницаемость и сопротивление образца (см. рис. 3 б) не зависят от температурного отжига и воздействия постоянным магнитным полем. В тоже время отжиг образца при температуре параэлектрической фазы приводит к увеличению сопротивления и уменьшению диэлектрической проницаемости на более низких частотах. Постоянное магнитное поле оказывает влияние на диэлектрические характеристики только в случае отожженного образца, уменьшая величину электрического сопротивления.

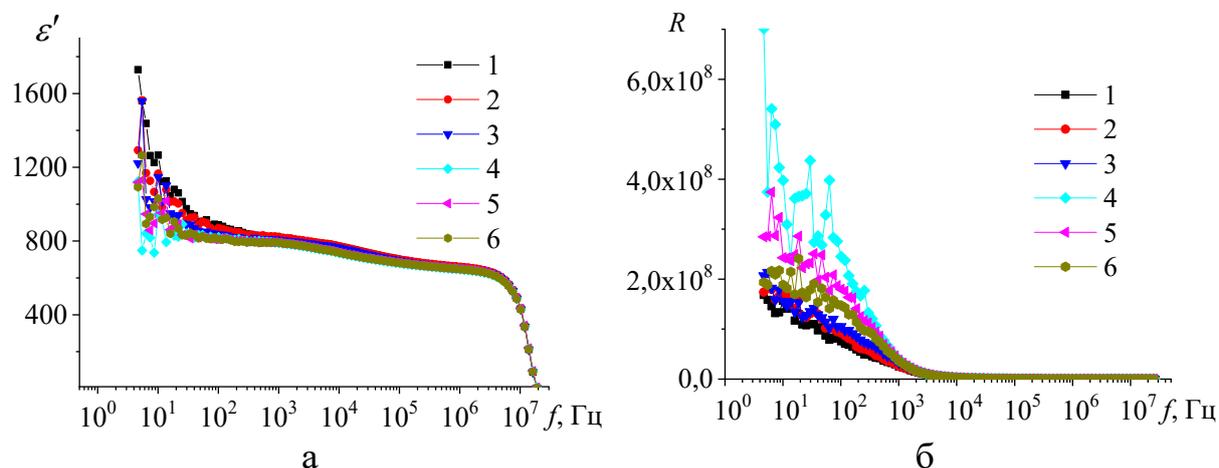


Рис. 3 Частотные зависимости диэлектрической проницаемости (а) и электрического сопротивления (б) композита титанат бария – феррит бария.

Диаграммы дисперсии комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon''$  ( $\epsilon'$ ) показали зависимость релаксационных процессов на низких частотах, соответствующих области линейной дисперсии, от воздействия магнитного поля (см. рис. 4 а). На этих частотах анализ

линейной дисперсии проводился с использованием эмпирического приема по диаграммам электрического модуля  $\beta''$  ( $\beta'$ ) (см. рис. 4 б). Частота перехода от линейной дисперсии к дисперсии, описываемой «классическим» уравнением Гаврильяка – Негами, соответствует частоте, при которой происходит резкое изменение хода частотных зависимостей, как электрического сопротивления, так и диэлектрической проницаемости (см. рис. 3).

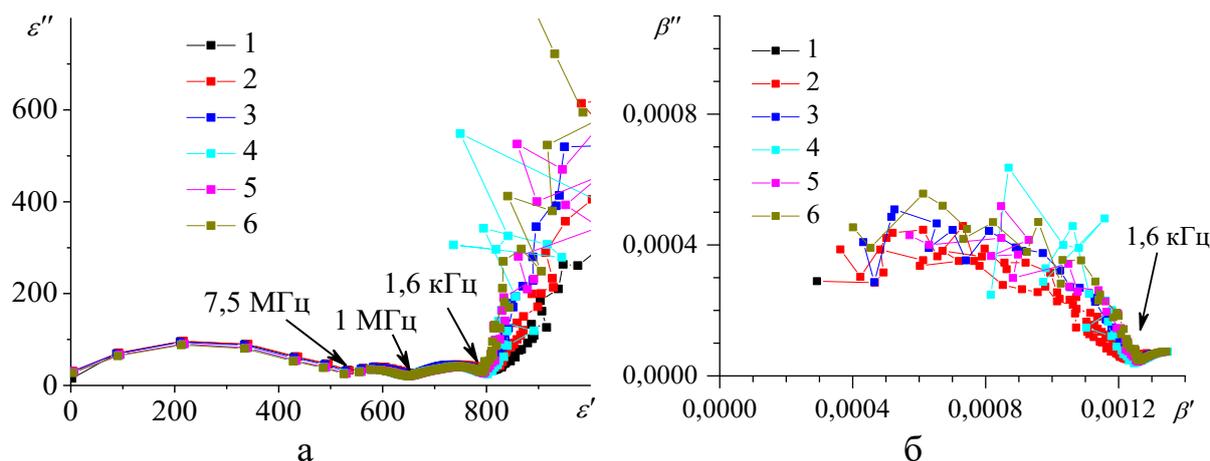


Рис. 4. Диаграммы дисперсии комплексной диэлектрической проницаемости (а) и диэлектрического модуля (б) композита титанат бария – феррит бария.

Наличие области линейной дисперсии определяется, согласно [15], приповерхностными релаксационными процессами. Поскольку у исследуемого в работе композита одну поверхность составляет слой феррита бария, обладающего магнитными свойствами, то очевидно, что именно этот слой определяет влияние магнитного поля на релаксационные процессы на низких частотах.

В области «классической» дисперсии обращает на себя внимание наличие трех дуг окружности, две из которых разделены достаточно пологим минимумом. Частота, этого минимума составляет  $\sim 1$  МГц, что соответствует частоте пьезоэлектрического резонанса для пьезоэлектрического модуля  $d_{33}$  (колебания в направлении, перпендикулярном границе раздела титанат бария – феррит бария).

Исследование пьезоэлектрического эффекта производилось методом резонанса–антирезонанса [16]. Слоистый композит (связностью 2-2) имеет величину пьезоэлектрического модуля  $d_{31} > 40 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н и  $d_{33} > 120 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н, в то время как у гомогенного образца связностью 0-3  $d_{31} > 30 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н и  $d_{33} > 190 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н.

Интересно отметить, что наличие границы раздела двух материалов в слоистом композите спровоцировало появление дополнительных, более

мелких резонансных и антирезонансных пиков. При связности композита 0-3 такого явления замечено не было.

#### 4. Заключение

В результате проведенных исследований выявлена сильная диффузия железа в слой керамики титаната бария. Обнаружено, что железо проникает равномерно, со случайными отклонениями. Экспоненциального спада по мере вхождения железа в титанат бария не наблюдается. Установлено, что постоянное магнитное поле не влияет на диэлектрические характеристики в переменном электрическом поле на частотах выше 1600 Гц. При более низких частотах, отжиг в параэлектрической фазе увеличивает сопротивление образца, а последующее воздействие постоянного магнитного поля приводит к его уменьшению. Изменение типа связности магнитоэлектрического композита от 0-3 к 2-2 добавляет более мелкие резонансные и антирезонансные пики. При этом образцы имеют достаточные для практического применения величины пьезоэлектрического модуля ( $d_{31} > 40 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н;  $d_{33} > 120 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н).

*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/UFN.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/UFN.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/UFN.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. **Yang, T. N.** Predicting effective magnetoelectric response in magnetic-ferroelectric composites via phase-field modeling / T. N. Yang, J.-M. Hu, C. W. Nan, L. Q. Chen // Applied Physics Letters. – 2014. – V. 104. – I. 5. – P. 052904-1-052904-5. DOI: 10.1063/1.4863941.
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. **Srinivasan, G.** Magnetolectric interactions in hot-pressed nickel zinc ferrite and lead zirconate titanate composites. / G. Srinivasan, C.P. Devreugd, C.S. Flattery, V.M. Laletsin, N. Paddubnaya // *Ferroelectrics*. – 2004. – V. 85. – I. 13. – P. 2550-2552. DOI: 10.1063/1.1795365.
14. **Малышкина, О.В.** Оптимизация технологии получения композита на основе феррита бария и титаната бария / О.В. Малышкина, Гр.С. Шишков, А.И. Иванова // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2021. – Вып. 13. – С.740–749. DOI: 10.26456/pcasenn/2021.13.740
15. **Jonscher, A.K.** Dielectric relaxation in solids / A.K. Jonscher. – London: Chelsea Dielectrics Press, 1983. – 396 p.
16. **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.

#### 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. Yang T. N., Hu J.-M., Nan C. W., Chen L. Q. Predicting effective magnetoelectric response in magnetic-ferroelectric composites via phase-field modeling, *Applied Physics Letters*, 2014, vol. 104, issue 5, pp. 052904-1-052904-5. DOI: 10.1063/1.4863941.
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) [Okazaki 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. Srinivasan G., Devreugd C.P., Flattery C.S., Laletsin V.M., Paddubnaya N. Magnetoelectric interactions in hot-pressed nickel zinc ferrite and lead zirconate titanate composites, *Ferroelectrics*, 2004, vol. 85, issue 13, pp. 2550-2552. DOI: 10.1063/1.1795365.
14. Malyshkina O.V., Shishkov Gr.S., Ivanova A.I. Optimizatsiya tekhnologii polucheniya kompozita na osnove

ferrita bariya i titanata bariya [Optimization of technology for producing a composite based on barium ferrite and barium titanate], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 2021, vol. 13, pp. 740-749. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.740. (In Russian).

15. Jonscher, A.K. Dielectric relaxation in solids. London: Chelsea Dielectrics Press, 1983. – 396 p.

16. 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, TEKHNOFERA Publ., 2013. – 272 p.

*Original paper*

**STRUCTURE AND DIELECTRIC PROPERTIES OF A LAYERED COMPOSITE OF  
BARIUM TITANATE – BARIUM FERRITE**

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

*Tver State University, Tver, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.194

**Abstract:** The paper presents the results of a study of the influence of a constant magnetic field on the dispersion of the complex permittivity of a layered composite (connectivity 2-2) based on barium titanate - barium ferrite. It is shown that in the manufacture of a magnetoelectric composite of barium titanate - barium ferrite with a connectivity of 2-2, a strong diffusion of iron appears into the barium titanate ceramic layer at the interface between the two materials. It was found that iron penetrates evenly, with random deviations, and no exponential decline as iron enters into barium titanate is observed. It has been established that a constant magnetic field does not affect the dielectric characteristics in an alternating electric field at frequencies above 1600 Hz. At lower frequencies, annealing in the paraelectric phase increases the resistance of the sample, and subsequent exposure to a constant magnetic field leads to its decrease. It was revealed that changing the type of connectivity of the magnetoelectric composite from 0-3 to 2-2 adds additional, smaller, resonance and antiresonance peaks in the study of piezoelectric properties by the resonance-antiresonance method. At the same time, the samples have sufficient values of the piezoelectric modulus for practical application ( $d_{31} > 40 \cdot 10^{-12}$  C/N;  $d_{33} > 120 \cdot 10^{-12}$  C/N).

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

*Малышкина Ольга Витальевна – д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры компьютерной безопасности и математических методов управления ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»*

*Шишков Григорий Сергеевич – аспирант 4 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, Professor of the Department of Computer Security and Mathematical Control Methods, Tver State University*

*Gregori S. Shishkov – 4<sup>th</sup> year postgraduate student, Tver State University*

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

Поступила в редакцию/received: 11.08.2022; после рецензирования/reviced: 27.08.2022; принята/accepted 07.09.2022.