

УДК 532.529

МУЛЬТИФЕРРОИКИ $\text{Bi}_{0,9}\text{M}_{0,1}\text{FeO}_3$ (M – La, Pr, Nd, Sm): ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© 2019 г. Г. Г. Гаджиев^{1, *}, З. М. Омаров¹, М.-Р. М. Магомедов^{1, 2}, Х. Х. Абдуллаев¹,
А. А. Амирова¹, Л. А. Резниченко³, С. В. Хасбулатов³

¹ФГБУН Институт физики им. Х.И. Амирханова
Дагестанского научного центра РАН, г. Махачкала, Россия

²ФГБОУВО Дагестанский государственный медицинский университет
Министерства здравоохранения РФ, г. Махачкала, Россия

³Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета,
г. Ростов-на-Дону, Россия

*E-mail: Gadjiev@mail.ru

Поступила в редакцию 04.06.2018 г.

После доработки 24.07.2018 г.

Принята к публикации 25.12.2018 г.

Проведены комплексные исследования теплофизических свойств (теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, коэффициент теплового расширения) твердых растворов мультиферроиков $\text{Bi}_{0,9}\text{M}_{0,1}\text{FeO}_3$ (M – La, Pr, Nd, Sm) в области температур 300–800 К. Установлено, что в области температуры Нееля (640–650 К) наблюдаются аномалии теплофизических свойств, обусловленные фазовыми переходами. Предложены формулы расчета исследованных теплофизических свойств. Установлена четкая корреляция зависимостей теплофизических свойств в областях структурных фазовых переходов.

DOI: 10.1134/S0040364419040057

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время проявляется повышенный интерес к исследованию мультиферроиков, которые обладают рядом уникальных свойств, в частности сосуществованием магнитного и электрического упорядочения. Современные исследования ряда мультиферроиков указывают на перспективность таких материалов для создания сенсоров магнитного поля, устройств записи–считывания информации, устройств спинтроники, СВЧ и других приборов. К числу таких соединений относится феррит висмута BiFeO_3 , в котором реализуется сегнетоэлектрический (при $T_c \sim 1083$ К) и антиферромагнитный (при $T_N \sim 643$ К) фазовые переходы [1–4]. Феррит висмута при комнатной температуре имеет пространственную группу $R3c$. Кристаллическая структура характеризуется ромбоэдрически искаженной перовскитовой ячейкой, очень близкой к кубу. В области температур ниже точки Нееля T_N феррит висмута обладает сложной пространственно-модулированной магнитной структурой циклоидного типа, которая не допускает наличия ферромагнитных свойств [3–5]. Необходимым условием возникновения магнитоэлектрического эффекта является разрушение его пространственно-модулированной спиновой структуры, которое может быть достигнуто леги-

рованием феррита висмута редкоземельными элементами.

Исследования керамических составов $\text{Bi}_{1-x}\text{M}_x \cdot \text{FeO}_3$ (M – La, Pr, Nd, Sm) с помощью структурных, электрических и магнитных методов проводились в ряде работ [5–8]. Однако остается много нерешенных вопросов, связанных с природой фазовых переходов в твердых растворах BiFeO_3 , модифицированных редкоземельными элементами, и особенностями поведения физических и структурных свойств в широкой температурной области. Все это стимулирует дальнейшие подробные исследования мультиферроиков на основе BiFeO_3 .

Исследования теплофизических свойств в широком температурном интервале с шагом 1–2 градуса позволяют регистрировать их аномалии любой природы и получать важную информацию о природе физических явлений в исследуемых материалах.

В данной работе представлены результаты исследований теплофизических свойств твердых растворов мультиферроиков $\text{Bi}_{0,9}\text{M}_{0,1}\text{FeO}_3$ (M – La, Pr, Nd, Sm) в области температур 300–800 К.

Таблица 1. Свойства твердых растворов $\text{Bi}_{0.9}\text{M}_{0.1}\text{FeO}_3$

Твердый раствор	x	Фаза	Плотность ρ , г/см ³	Относительная плотность, %
$\text{Bi}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{FeO}_3$	0.05–0.20	$\text{P}_3 + \text{P}$	7.40	88.4
$\text{Bi}_{0.9}\text{Pr}_{0.1}\text{FeO}_3$	0.05–0.10	$\text{P}_3 + \text{P}$ + частично моноклинная структура	7.28	88.4
$\text{Bi}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{FeO}_3$	0.10	P_3 , два фазовых перехода $\text{P}_3 - \text{P}$	7.32	88.4
$\text{Bi}_{0.9}\text{Sm}_{0.1}\text{FeO}_3$	0.05–0.10	$\text{P}_3 + \text{P}$	7.5	92.6

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ

Синтезом, исследованием структуры, микро-структуры диэлектрических свойств феррита висмута, легированного редкоземельными элементами (РЗЭ), в основном занимаются в НИИ физики ЮФУ (Ростов-на-Дону). Из множества литературных источников необходимо особо выделить обзоры по мультiferроикам, рассматривающие вклад, технологию изготовления BiFeO_3 и твердых растворов, депонированных РЗЭ, синтез, структуру, микроструктуру, диэлектрические и теплофизические свойства BiFeO_3 , легированного РЗЭ (La, Pr, Nd, Sm) [5–8].

Объектом исследования являются твердые растворы (ТР) керамики состава $\text{Bi}_{0.9}\text{M}_{0.1}\text{FeO}_3$ ($\text{M} - \text{La, Pr, Nd, Sm}$). Образцы получены по обычной керамической технологии, включающей двухстадийный синтез BiFeO_3 . Модификаторами служили оксиды РЗЭ La_2O_3 , Pr_2O_3 , Nd_2O_3 , Sm_2O_3 высокой степени чистоты (ч. д. а, ос. ч) при температурах синтеза из интервала 900–1050 К (в зависимости от состава) и последующее спекание без приложения давления при температурах в интервале 1140–1240 К (в зависимости от состава). Свойства твердых растворов $\text{Bi}_{0.9}\text{M}_{0.1}\text{FeO}_3$ приведены в табл. 1. Следует отметить, что в данных твердых растворах с повышением температуры доли сосуществования ромбоэдрической (P_3) и ромбической (P) фаз уменьшается и в области 638–645 К преобладающей является моноклинная структура.

Рентгенографические исследования при комнатной температуре проводились методом порошковой дифракции с использованием дифрактометра ДРОН-3 (отфильтрованное CoK_α -излучение, схема фокусировки по Брэггу–Брентано). Высокотемпературные исследования проводили на автоматическом дифрактометре АДП-1 с гониометром фирмы VEB Freiburger Präzisionsmechanik. Шаг по температуре переменный – 10–20 градусов, изотермическая выдержка 10 мин.

Исследование поликристаллического (зернового) строения мультiferроиков выполнялось в отраженном свете на оптическом микроскопе

Neophot 21 и инвертированном высокоточном микроскопе Leica DMI 5000M.

Экспериментальная плотность $\rho_{\text{эксп}}$ образцов измерялась методом гидростатического взвешивания в октане; после прессования мелкодисперсных порошков рентгеновская плотность $\rho_{\text{рентг}}$ рассчитывалась по формуле $\rho_{\text{рентг}} = 1.66M/V$, где M – вес формульной единицы в г, V – объем перовскитной ячейки в Å^3 . Относительная плотность $\rho_{\text{отн}}$ вычислялась по формуле $(\rho_{\text{эксп}}/\rho_{\text{рентг}}) \times 100\%$. Температурная зависимость $\rho(T)$ оценивалась по данным о коэффициенте объемного расширения $\beta = 3\alpha$ (α – коэффициент теплового линейного расширения) и массах образцов.

Теплопроводность λ измерялась абсолютным компенсационным методом в стационарном режиме [9]. Погрешность измерения λ при 300 К составляла 3%, при 800 К – 5%.

Кроме этого, теплопроводность образцов рассчитывалась по данным измерений температуропроводности методом лазерной вспышки на установке LFA-457 “MicroFlash” (фирма NEZSCH): $\lambda = KC_p\rho$, где K – температуропроводность, C_p – теплоемкость. С учетом температурной зависимости экспериментальных данных C_p и ρ расхождения по λ на обеих установках составляли не более 5%. В табл. 2 представлены данные о температуропроводности и плотности исследованных пьезокерамик $\text{Bi}_{0.9}\text{M}_{0.1}\text{FeO}_3$.

Температурная зависимость удельной теплоемкости C_p измерялась на дифференциальном сканирующем калориметре DSC204F1 (NETZSCH) с погрешностью измерений 3%. Образцы для измерений имели следующие размеры: диаметр – 5 мм, высота – 1–2 мм.

Коэффициент теплового линейного расширения – КТР измерялся емкостным dilatометрическим методом, разработанным в Институте физики ДНЦ РАН [10]. Чувствительность метода – 10^{-9} м, погрешность измерений КТР в исследованном интервале – 3%. Размеры образцов: диаметр – 5–8 мм, высота – 10–15 мм.

Таблица 2. Температурная зависимость теплопроводности и плотности пьезокерамик $\text{Bi}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{FeO}_3$, ($M - \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$)

T, K	$\text{Bi}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{FeO}_3$		$\text{Bi}_{0.9}\text{Pr}_{0.1}\text{FeO}_3$		$\text{Bi}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{FeO}_3$		$\text{Bi}_{0.9}\text{Sm}_{0.1}\text{FeO}_3$	
	$K \times 10^6, \text{m}^2/\text{c}$	$\rho, \text{г}/\text{см}^3$	$K \times 10^6, \text{m}^2/\text{c}$	$\rho, \text{г}/\text{см}^3$	$K \times 10^6, \text{m}^2/\text{c}$	$\rho, \text{г}/\text{см}^3$	$K \times 10^6, \text{m}^2/\text{c}$	$\rho, \text{г}/\text{см}^3$
300	1.296	7.400	1.186	7.280	1.180	7.320	1.226	7.500
343	1.182	7.395	1.120	7.274	1.175	7.316	1.044	7.496
373	0.972	7.392	0.932	7.270	0.848	7.312	0.981	7.492
423	0.725	7.387	0.724	7.265	0.668	7.288	0.772	7.489
473	0.614	7.383	0.614	7.260	0.588	7.285	0.625	7.485
498	0.572	7.380	0.566	7.256	0.560	7.282	0.587	7.483
523	0.528	7.374	0.522	7.252	0.523	7.279	0.537	7.480
573	0.478	7.366	0.465	7.248	0.470	7.276	0.478	7.477
598	0.447	7.360	0.444	7.240	0.452	7.272	0.451	7.473
623	0.424	7.355	0.426	7.235	0.424	7.267	0.430	7.470
633	0.413	7.350	0.419	7.230	0.416	7.265	0.422	7.465
643	0.404	7.344	0.406	7.227	0.408	7.262	0.412	7.460
648	0.398	7.340	0.407	7.224	0.403	7.260	0.404	7.457
653	0.403	7.337	0.409	7.200	0.401	7.258	0.398	7.454
670	0.412	7.333	0.414	7.197	0.413	7.254	0.408	7.450
698	0.413	7.330	0.416	7.193	0.414	7.222	0.407	7.450
723	0.413	7.327	0.417	7.190	0.416	7.250	0.410	7.449
773	0.414	7.323	0.417	7.185	0.416	7.248	0.412	7.447
800	0.406	7.320	0.418	7.180	0.417	7.247	0.413	7.445

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Теплофизические свойства феррита висмута и ТР $\text{Bi}_{1-x}\text{M}_x\text{FeO}_3$ ($M - \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$) при высоких температурах исследовались в работах [8, 11–15]; BiFeO_3 , $\text{Bi}_{0.91}\text{Nd}_{0.09}\text{FeO}_3$ в области высоких температур – в [16].

Образцы твердых растворов для измерения λ представляли собой цилиндры диаметром 26.2 мм и высотой 3 мм. После шлифовки и полировки образцы отжигались в воздухе при температуре 900°C в течение 5–7 ч для устранения поверхностных напряжений и дислокаций.

На рис. 1 представлены экспериментальные данные температурной зависимости теплопроводности λ твердых растворов $\text{Bi}_{0.90}\text{M}_{0.10}\text{FeO}_3$ в области температур 300–800 К. Теплопроводность $\text{Bi}_{0.90}\text{Sm}_{0.10}\text{FeO}_3$ по величине и характеру зависимости почти совпала с данными для $\text{Bi}_{0.90}\text{La}_{0.10}\text{FeO}_3$ и не указана на графике.

Теплопроводности всех ТР с температурой снижаются, причем от лантана к неодиму ее величина уменьшается, при этом характеры $\lambda(T)$ идентичны. Как известно, в идеальных диэлектриках и

полупроводниках решеточная (фононная) теплопроводность уменьшается как $\lambda \sim T^{-1}$ (закон Эйнена). В ТР величины λ и температурные зависи-

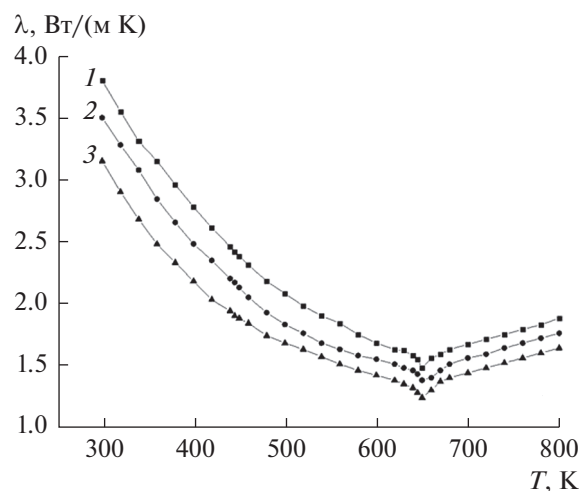


Рис. 1. Температурная зависимость теплопроводности твердых растворов мультиферроиков $\text{Bi}_{0.9}\text{M}_{0.1}\text{FeO}_3$: 1 – $M - \text{La}_{0.10}$, 2 – $\text{Pr}_{0.10}$, 3 – $\text{Nd}_{0.10}$.

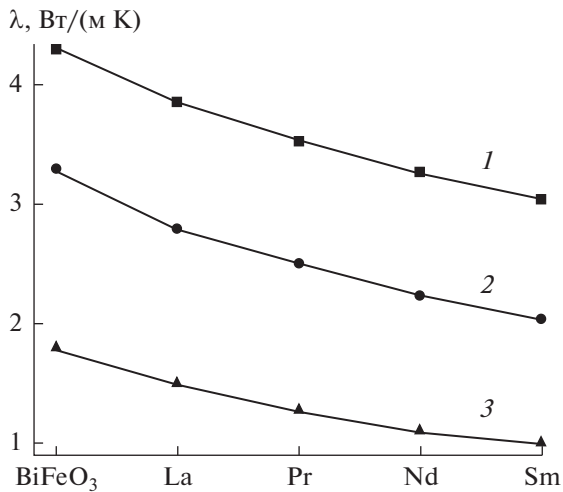


Рис. 2. Изотермы теплопроводности $\text{Bi}_{0.9}\text{M}_{0.1}\text{FeO}_3$ с пористостью 10%: 1 – 300 К, 2 – 400, 3 – 600.

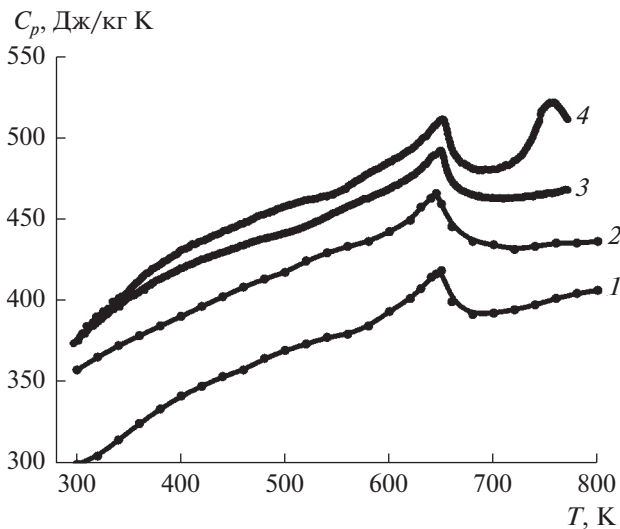


Рис. 3. Температурная зависимость теплоемкости мультиферроиков $\text{Bi}_{0.9}\text{M}_{0.1}\text{FeO}_3$: 1 – $\text{M}=\text{La}_{0.1}$, 2 – $\text{Pr}_{0.1}$, 3 – $\text{Nd}_{0.1}$, 4 – $\text{Sm}_{0.1}$.

мости отклоняются от T^{-1} в сторону уменьшения степени, т.е. $n < 1$ ($n = 0.9-0.7$). Это связано с появлением дополнительного теплового сопротивления, где кроме фонон-фононного рассеяния возникают рассеяния, связанные с изменением среднего атомного веса (дефект масс) и упругих параметров решетки.

Анализ экспериментальных данных показал, что λ с температурой в этих растворах изменяется как $\lambda_p = cT^{-0.78}$ вплоть до 640 К. В области $T_N = 643-650$ К наблюдается минимум λ и K , где происходит структурный фазовый переход от ромбоэдрической–ромбической к моноклинной структуре.

Температурная зависимость λ также оценена по известной формуле Эйкена

$$\lambda = (1/3)C_p \nu l, \tag{1}$$

где ν – средняя скорость распространения акустических волн, l – длина свободного пробега фононов. Измерения ν проводились эхо-импульсным методом, длина свободного пробега вычислялась по данным о температуропроводности: $l = 3K/\nu$. В пределах ошибок измерений расчеты по формуле (1) удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Исследованные ТР имели различную пористость от 86 до 92%. Для оценки величины и температурной зависимости λ составов с одинаковой пористостью бралась оптимальная пористость 10%, при которой можно наблюдать влияние на λ ТР с изменениями атомного веса и упругих параметров. Ранее [17–19] по исследованию теплопроводности твердых растворов оптических керамик в зависимости от пористости была предложена следующая формула:

$$\lambda = \lambda_0 (1 - p)(1 - p)^{8/3},$$

где λ_0 – теплопроводность беспористой керамики, p – пористость в %.

Расчетные значения λ с пористостью 10% при различных температурах ТР представлены на рис. 2.

Наблюдается уменьшение λ от BiFeO_3 к керамике с самарием, где тепловое сопротивление растет вследствие вклада дефекта масс, упругих параметров и ионного радиуса в последовательности $\text{BiFeO}_3-\text{La}-\text{Pr}-\text{Nd}-\text{Sm}$.

Выше 650 К ТР переходят в кубическую структуру и $\lambda(T)$ растут почти линейно и различаются незначительно. Необходимо отметить, что теплопроводность всех составов решеточная, т.е. эти ТР имеют низкую электропроводность $\sim 10^{10} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$.

На рис. 3 представлена температурная зависимость теплоемкости при постоянном давлении от температуры. В интервале 320–640 К C_p растет и экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными, описываемыми уравнением Майера–Келли

$$C_p(T) = a + bT - cT^{-2}, \tag{2}$$

где a, b и c – постоянные, значения которых представлены в табл. 3.

В области 646–650 К наблюдаются максимумы C_p , причем T_N смещается в более низкую область температур (от La к Sm ~ 4 К). Здесь область сосуществования ромбоэдрической и ромбической фаз интенсивно уменьшается и ТР переходят в моноклиническую фазу (смятие решетки), что приводит к интенсивному росту C_p (от 635 до

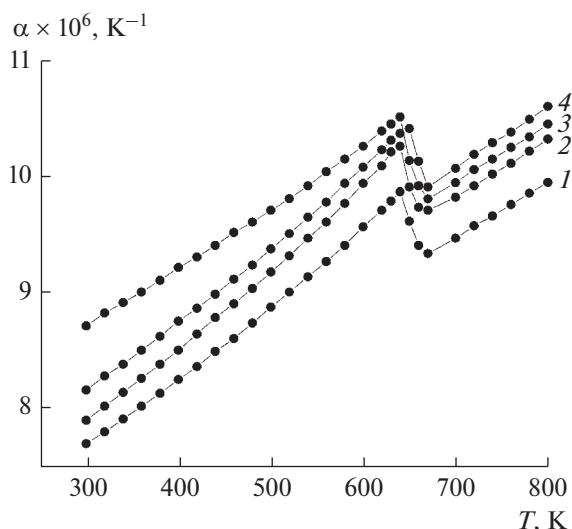


Рис. 4. Температурная зависимость КТР мультиферроиков $\text{Bi}_{0.9}\text{M}_{0.1}\text{FeO}_3$: 1–4 – см. рис. 3.

650 К), в результате чего происходят антиферромагнитные фазовые переходы. Далее в интервале 650–660 К резкое уменьшение C_p связано с перестройкой моноклинная–кубическая фазы.

На рис. 4 представлена температурная зависимость КТР. От 300 К КТР растет почти линейно до 640–645 К, далее при 645–650 К имеет максимум, причем от La к Sm значения максимумов увеличиваются, что связано со структурным фазовым переходом при T_N , при которой происходит ослабление химической связи в системе.

Наблюдается удовлетворительное согласие в области T_N по максимумам λ , K , C_p и КТР. Резкое уменьшение КТР от T_N (почти скачками) можно видеть и в пьезокерамиках. Такое явление объясняется смятием (сжатием) решетки при переходе так называемой “псевдокубической фазы” в кубическую.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наблюдается связь между теплопроводностью, теплоемкостью и КТР в исследованном интервале температур, особенно в области перехода $\text{P}_3\text{--P}$ в тетрагональную, псевдоку-

бическую, моноклинную структуры (область антиферромагнитного перехода – T_N).

В ряду La, Pr, Nd, Sm от 300 до 640 К теплопроводность и температуропроводность уменьшаются, хотя ход температурных зависимостей идентичен. В этой области C_p от La к Sm растет, как и КТР.

В области антиферромагнитного перехода (T_N) наблюдались минимумы теплопроводности и температуропроводности, максимумы C_p и КТР, причем температура Нееля от La к Sm уменьшалась в сторону низких температур (от 650 К для La до 645 К для Sm).

В твердых растворах с $x = 0.10$ достигаются оптимальные значения микрооткликов и пьезо-сегнетоэлектрических свойств, т.е. эти твердые растворы могут стабильно работать в экстремальных условиях при высоких температурах.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России (проекты №№ 3.6371.2017/8.9, 3.6439.2017/8.9) с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел” НИИ физики Южного федерального университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Smolenski G.A., Yudin V.M.* Weak Ferromagnetism of Some Perovskites of $\text{BiFeO}_3\text{PbFe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$ // *Sov. Phys. Solid State.* 1965. V. 6 (12). P. 3668.
2. *Catalan G., Scott F.* Physics and Applications of Bismuth Ferrite // *Adv. Mat.* 2009. V. 21. P. 2463.
3. *Пятаков А.П., Звездин А.К.* Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики // *УФН.* 2012. Т. 182. Вып. 6. С. 594.
4. *Karimi S., Reaney I.M., Han Y., Pocerony J., Sterianoy I.* Crystal Chemistry and Domain Structure of Rare-earth Doped BiFeO_3 Ceramics // *J. Mater. Sci.* 2009. V. 44. P. 5102.
5. *Вербенко И.А., Резниченко Л.А.* Мультиферроики: взгляд технолога // *Тр. II Междун. молодежного симп. “Физика бессвинцовых пьезоактивных и родственных материалов (Анализ современного состояния и перспективы развития)”*. (“LFRM-2013”). 2–6 сентября 2013. Ростов-на-Дону–Туапсе. Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2013. Т. 1. Вып. 2. С. 65.
6. *Хасбулатов С.В., Павелко А.А., Вербенко И.А., Шилкина Л.А., Алешин В.А., Гаджиев Г.Г., Омаров З.М., Абдуллаев Х.Х., Бакмаев А.Г., Магомедов М.–Р.М., Резниченко Л.А.* Синтез, структура, микроструктура, диэлектрические и теплофизические свойства легированного феррита висмута. Ч. 1–5. $\text{BiFeO}_3/\text{La, Pr, Nd, Sm}$ // *Сб. тр. XI Междун. семинара “Магнитные фазовые переходы”*. Махачкала, 2015. С. 100.
7. *Карпинский Д.В., Троянчук И.О., Желудкевич А.Л.* Кристаллическая структура, пьезоэлектрические и магнитные свойства твердых растворов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sm}_x\text{FeO}_3$ // *ФТТ.* 2016. Т. 58. Вып. 8. С. 1537.

Таблица 3. Коэффициенты в формуле (2)

Состав	a	b	$c, 10^6$
$\text{Bi}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{FeO}_3$	320	0.285	2.25
$\text{Bi}_{0.9}\text{Pr}_{0.1}\text{FeO}_3$	352	0.228	2.40
$\text{Bi}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{FeO}_3$	276	0.205	1.28
$\text{Bi}_{0.9}\text{Sm}_{0.1}\text{FeO}_3$	325	0.232	1.75

8. Хасбулатов С.В., Павелко А.А., Шилкина Л.А., Резниченко Л.А., Гаджиев Г.Г., Бакмаев А.Г., Магомедов М.М., Омаров З.М., Алёшин В.А. Фазовый состав, микроструктура, теплофизические и диэлектрические свойства мультиферроика $\text{Bi}_{1-x}\text{D}_x\text{FeO}_3$ // Теплофизика и аэродинамика. 2016. № 3. С. 461.
9. Магомедов Я.Б., Гаджиев Г.Г. Прибор для измерения высокотемпературной теплопроводности твердых тел и их расплавов // ТВТ. 1990. Т. 28. № 1. С. 185.
10. Магомедов М.-Р.М., Камилев И.К., Омаров З.М., Исмаилов Ш.М., Хамидов М.М., Расулов М.М. Автоматизированная установка для измерения коэффициента теплового расширения твердых тел // ПТЭ. 2007. Т. 4. С. 165.
11. Каллаев С.Н., Омаров З.М., Гаджиев Г.Г., Резниченко Л.А. Теплоемкость мультиферроиков на основе BiFeO_3 // ЖЭТФ. 2014. Т. 145. С. 320.
12. Каллаев С.Н., Омаров З.М., Кубайтаев А.Я., Резниченко Л.А., Хасбулатов С.В. Диэлектрические свойства и теплоемкость мультиферроика $\text{Bi}_{1-x}\text{Sm}_x\text{FeO}_3$ // ФТТ. 2016. Т. 58. Вып. 4. С. 664.
13. Каллаев С.Н., Омаров З.М., Гаджиев Г.Г., Митаров Р.Г., Билалов А.Р., Резниченко Л.А., Ферзилаев Р.М., Садыков С.А. Теплоемкость и диэлектрические свойства мультиферроиков $\text{Bi}_{1-x}\text{Gd}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0-0.20$) // ФТТ. 2014. Т. 56. Вып. 7. С. 1360.
14. Каллаев С.Н., Бакмаев А.Г., Резниченко Л.А. Термодиффузия и теплопроводность мультиферроиков BiFeO_3 и $\text{Bi}_{0.95}\text{La}_{0.05}\text{FeO}_3$ в области высоких температур // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 97. Вып. 8. С. 541.
15. Гаджиев Г.Г., Хасбулатов С.В., Резниченко Л.А., Абдуллаев Х.Х., Омаров З.М., Магомедов М.М. Теплофизические свойства мультиферроиков $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0.30; 0.40; 0.50$) при высоких температурах // Тр. V Междун. междисц. симп. "Среды со структурным и магнитным упорядочением" (Multiferroics-5). Ростов-на-Дону, 2015. С. 112.
16. Клындюк А.И., Хорт А.А. Теплофизические свойства мультиферроиков BiFeO_3 , $\text{Bi}_{0.91}\text{Nd}_{0.09}\text{FeO}_3$ и $\text{Bi}_{0.91}\text{Mn}_{0.09}\text{FeO}_3$ в области высоких температур // ФТТ. 2016. Т. 58. Вып. 6. С. 1243.
17. Гаджиев Г.Г., Исмаилов Ш.М. Влияние пористости и концентрации примесей BeO на упругие свойства керамики SiC // Журн. прикл. химии. 1999. Т. 72. Вып. 10. С. 1598.
18. Гаджиев Г.Г., Исмаилов Ш.М. Тепловые свойства керамики на основе соединений $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ // ТВТ. 1993. Т. 31. № 3. С. 390.
19. Гаджиев Г.Г. Тепловые и упругие свойства керамики на основе оксида цинка при высоких температурах // ТВТ. 2003. Т. 41. № 6. С. 877.