УЛК 661.887

МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВіFeO₃, СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ РАСТВОРНОГО ГОРЕНИЯ

© 2020 г. Н. А. Ломанова^{1, *}, М. В. Томкович¹, Д. П. Данилович², А. В. Осипов³, В. В. Панчук^{4, 5}, В. Г. Семенов^{4, 5}, И. В. Плешаков¹, М. П. Волков¹, В. В. Гусаров¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, 194021 Россия

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Московский пр., 26, Санкт-Петербург, 190013 Россия

³Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук, наб. Макарова, 2 лит. Б, Санкт-Петербург, 199034 Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7—9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

⁵Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, ул. Ивана Черных, 31—33 лит. А, Санкт-Петербург, 198095 Россия

> *e-mail: natus@mail.ioffe.ru Поступила в редакцию 05.05.2020 г. После доработки 12.08.2020 г. Принята к публикации 13.08.2020 г.

Нанокристаллические материалы на основе ${\rm BiFeO_3}$ со средним размером кристаллитов около 40 нм синтезированы методом растворного горения из нитратов висмута и железа с использованием в качестве топлива сахарозы и винной кислоты. Характеризация образцов выполнена методами рентгеновской дифрактометрии, гелиевой пикнометрии, сканирующей электронной микроскопии, элементного энергодисперсионного микроанализа, мессбауэровской спектроскопии. Данные магнитометрии показали, что в зависимости от способа синтеза магнитный отклик материалов различается на несколько порядков.

Ключевые слова: перовскиты, ортоферрит висмута, мессбауэровская спектроскопия, магнитометрия **DOI:** 10.31857/S0002337X20120118

ВВЕДЕНИЕ

Ортоферрит висмута (BiFeO₃) — единственное соединение с перовскитоподобной структурой, являющееся мультиферроиком выше комнатной температуры [1—3]. Оно обладает высокими температурами магнитного (точка Нееля $t_N \approx 370^{\circ}$ С) и сегнетоэлектрического (точка Кюри $t_C \approx 830^{\circ}$ С) упорядочения [1].

При комнатной температуре $BiFeO_3$ имеет ромбоэдрическую структуру (пр. гр. R3c), допускающую существование линейного магнитоэлектрического эффекта. Сегнетоэлектрическая поляризация ориентирована вдоль направления [111] псевдокубической элементарной ячейки. Магнитные моменты ионов железа связаны ферромагнитным образом в плоскости (111) и антиферромагнитным образом между смежными плоскостями, реализуя в области температур ниже t_N антиферромагнитное упорядочение G-типа. Вследствие флексомагни-

тоэлектрического взаимодействия в объемном ортоферрите висмута возникает пространственно-модулированная циклоидная спиновая структура с периодом $\lambda_c = 62 \pm 2$ нм [4, 5], подавляющая слабый ферромагнетизм и, соответственно, линейный магнитоэлектрический эффект. Поэтому получение материалов на основе ортоферрита висмута, размерное состояние и морфология которых способствуют подавлению спиновой циклоиды, является актуальной задачей.

Анализ факторов, влияющих на магнитные свойства ортоферрита висмута, приведен во многих работах (например, [3, 6–14]). Авторы [3] по-казали их зависимость от размера наночастиц. В работе [7] установлено, что наночастицы $\operatorname{BiFeO_3} c$ размером ~ 50 нм, т.е. меньше λ_c , имеют магнитное упорядочение и повышенную намагниченность по сравнению с объемными образцами. В [8] влияние размера нанокристаллов $\operatorname{BiFeO_3}$ на

величину намагниченности связывается с нескомпенсированными спинами на их поверхности. Из работ [7—14] следует, что свойства нанокристаллического ${\bf BiFeO_3}$ зависят не только от размера кристаллов, но и от условий их синтеза.

Различные методы синтеза наночастиц ВіFeO3 описаны в работах [8–21], в которых анализируются основные факторы, определяющие получение материалов с отсутствием или минимальным содержанием примесных фаз системы Ві₂О₃— Fe₂O₃ в целевом продукте. Одним из широко используемых методов синтеза оксидных наночастиц, в том числе перовскитоподобных, является растворное горение [22]. В работах [10–14, 23–27] описано формирование перовскитоподобных оксидов при использовании этого метода с различными топливными компонентами и показана возможность создания однофазных материалов на их основе. Следует отметить, что одной из особенностей этого метода является возможность формирования порошковых материалов с устойчивыми значениями размерных и морфологических параметров кристаллитов.

В работах [8—12] показано, что условия синтеза влияют на состояние нанокристаллических материалов на основе $BiFeO_3$, вследствие чего их магнитные характеристики могут изменяться в пределах нескольких порядков.

Целью данной работы является определение влияния условий синтеза на магнитные характеристики порошковых материалов на основе нанокристаллического $BiFeO_3$ с близкими размерными и морфологическими характеристиками.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы ортоферрита висмута синтезировали методом растворного горения. В качестве реагентов для синтеза использовались пятиводный нитрат висмута ($Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$) квалификации "ос.ч.", девятиводный нитрат железа ($Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) квалификации "ч. д. а." и органическое топливо — винная кислота $C_4H_6O_6$ (T) или сахароза $C_{12}H_{22}O_{11}$ (S) квалификации "ч.".

Соотношение нитратов висмута и железа в исходной смеси задавалось эквимолярным, а соотношение топливного компонента с нитратными группами реагентов — T/N = 0.5 и S/N = 0.1 — в соответствии со стехиометрией окислительно-восстановительных реакций горения топлива

$$8Bi(NO_3)_3 + 8Fe(NO_3)_3 + 5C_{12}H_{22}O_{11} \rightarrow \rightarrow 8BiFeO_3 + 60CO_2 + 55H_2O + 24N_2.$$
 (2)

В дальнейшем в зависимости от способа получения ортоферрита висмута используется следующая маркировка образцов: при синтезе с винной кислотой -05T, с сахарозой -01S.

Для приготовления исходных составов смесь нитратов растворялась в 100 мл дистиллированной воды с добавлением 10 мл 65%-ного раствора HNO₃. В полученный раствор добавлялось органическое топливо, и далее он термостатировался при 170°С до изменения окраски вследствие комплексообразования. Затем раствор выпаривался при температуре 240°С до самовоспламенения. Образовавшиеся после горения смеси порошки последовательно термообрабатывались в режиме нагрев—изотермическая выдержка при температурах 350 и 550°С в течение 2 ч при каждой температуре.

Микроструктура и элементный состав образцов определялись методами сканирующей электронной микроскопии ($\mathbf{C}\mathbf{\mathfrak{M}}$) и элементного энергодисперсионного микроанализа (сканирующий электронный микроскоп FEI Quanta 200 с приставкой EDAX). Погрешность анализа составляла не более $\pm 0.3\%$.

Фазовый состав устанавливался по данным рентгеновской дифрактометрии (дифрактометр Rigaku SmartLab 3, CuK_{α} -излучение). Средний размер кристаллитов d определялся на основе процедуры уточнения профильных параметров дифрактограммы с использованием метода фундаментальных параметров. Распределение кристаллитов по размерам определялось в приближении логнормального закона распределения в программном комплексе SmartLab по модели Halder—Wagner. Чтобы исключить вклад от различных кристаллографических плоскостей, расчет проводился по наиболее интенсивному единичному рефлексу 012.

Пикнометрическая плотность образцов ρ_{pycn} определялась методом гелиевой пикнометрии (Ultra Pycnometer 1000, Quanta Chrome).

Мессбауэровское исследование выполнялось на спектрометре WISSEL в геометрии на поглощение при комнатной температуре (источник — 57 Со в матрице родия, величины изомерных сдвигов *IS* определены относительно *IS* α -Fe).

Полевые зависимости удельной намагниченности M измерены при 10 и 400 K на вибрационном магнитометре системы PPMS (Quantum Design) в диапазоне полей H = 0.5 к \Im .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Элементный анализ показал, что во всех образцах соотношение составляет Bi: Fe = 1.1: 0.9, что в пределах погрешности метода соответствует номинальному составу.

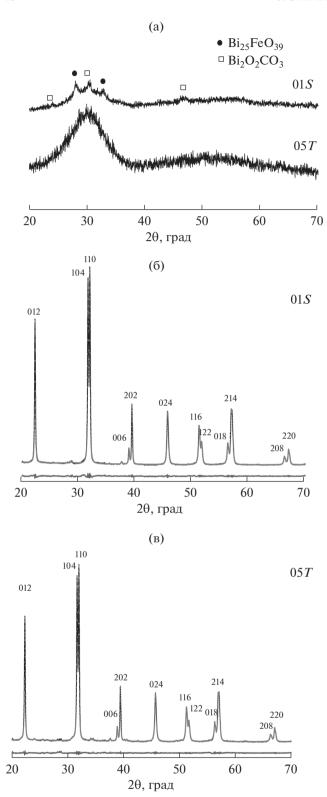


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы образцов после термообработки при 350 (а) и 550° С (б, в).

Анализ рентгеновских дифрактограмм продуктов горения после их термообработки при 350°C показывает различную степень кристаллизации

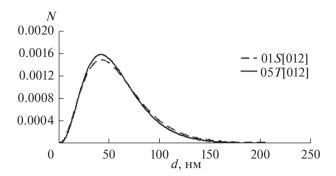


Рис. 2. Распределение кристаллитов по размерам.

образцов (рис. 1а). На дифрактограмме образца 05T фиксируется только рентгеноаморфное вещество. На дифрактограмме образца 01S, кроме того, наблюдаются рефлексы силленитоподобной фазы $Bi_{25}FeO_{39}$ (PDF 46-416) и оксикарбоната висмута Bi₂O₂CO₃ (PDF 41-1488), который мог образоваться при взаимодействии оксида висмута с продуктом горения СО2. Средний размер кристаллитов этих фаз составляет около 10 нм. Присутствие Ві₂О₂СО₃ на промежуточных стадиях синтеза, как следует из работ [15, 27], характерно для процесса формирования висмутсодержащих сложных оксидов. После термообработки при 550°C (рис. 16, 1в) независимо от вида топливного компонента в исходной смеси формируется фаза BiFeO₃ (PDF 14-181) без каких-либо заметных примесей других кристаллических фаз. Полученные значения параметров элементарной ячейки $BiFeO_3$ в образцах 05T и 01S (табл. 1) соответствуют литературным данным [3]. Средние значения размеров кристаллитов ВіFеО₃ в образцах 05T и 01S составляют около 40 нм (табл. 1). Приведенное на рис. 2 объемное распределение кристаллитов по размерам, определенное по профилю пика 012, практически одинаково для обоих образцов.

Таким образом, независимо от вида топливного компонента получены материалы на основе нанокристаллического ортоферрита висмута с практически одинаковыми элементным составом и фазовым состоянием, с близкими значениями средних размеров кристаллитов и характером объемного распределения кристаллитов по размерам.

На рис. 3 приведены СЭМ-изображения порошков, которые состоят из пластинчатых частиц и являются сростками нанокристаллов $BiFeO_3$, причем частицы образца 01S (рис. 3a) представлены существенно более мелкими пластинами, чем образца 05T (рис. 3б).

Меньшие значения пикнометрической плотности по сравнению с рентгеновской плотностью могут быть связаны, в частности, с наличием за-

Таблица 1. Характеристики образцов

Образец	a, Å	$b, ext{Å}$	$c, ext{Å}$	d, HM	ρ_{pycn} , Γ/cm^3	Р, %
01 <i>S</i>	5.58 ± 0.02	5.58 ± 0.02	6.94 ± 0.05	43 ± 2	7.7 ± 0.5	11 ± 2
05 <i>T</i>	5.58 ± 0.02	5.58 ± 0.02	6.93 ± 0.05	41 ± 2	5.7 ± 0.7	34 ± 6

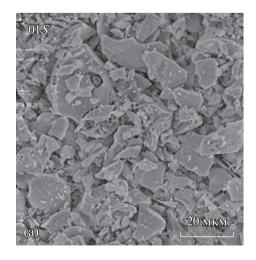
Примечание. Рентгеновская плотность образцов 8.7 г/см³.

крытых пор, которые образуются вследствие наложения двух процессов — газовыделения и спекания порошка в процессе горения. Особенно это характерно для образца 05T, имеющего практически в три раза большую закрытую пористость, чем образец 01S. Другой возможной причиной больших различий в значениях пикнометрической плотности образцов может быть накопление в процессе горения легких рентгеноаморфных продуктов, состоящих из твердых продуктов деструкции топлива без его полного окисления. Такой процесс также может быть обусловлен большим объемом образующихся газообразных продуктов, затрудняющих процесс смешения топлива с окислителем.

Различия в плотности образцов 05T и 01S, связанные с различным значением у них закрытой пористости или с накоплением разных количеств легких рентгеноаморфных продуктов, хорошо согласуются с тем фактом, что при использовании винной кислоты при формировании одного моля ВіГеО₃ газообразных продуктов выделяется почти в полтора раза больше, чем при использовании сахарозы, как можно заключить из сравнения реакций (1) и (2). Следует отметить, что образование закрытых пор в образце также затрудняет процесс полного окисления топлива и может приводить к аккумулированию в этих порах недоокисленных составляющих топлива. При этом в случае последующей термообработки таких материалов на воздухе процесс окисления недоокисленных составляющих топлива кислородом воздуха будет крайне затруднен. С большей вероятностью можно ожидать протекания окислительновосстановительных реакций с участием $BiFeO_3$.

Мессбауэровские спектры образцов, термообработанных при 550°C, представлены на рис. 4. На обоих спектрах выделяются по два секстета и одному дублету. Параметры разложения (табл. 2) показывают, что две секстетные компоненты, отвечающие двум неэквивалентным позициям ионов железа, практически идентичны у обоих образцов и характерны для магнитоупорядоченного BiFeO₃ [5, 12, 28]. Отличие состоит только в доле этого состояния в разных образцах. В образце 01S - 93%, в 05T - 98% атомов железа можно отнести к магнитоупорядоченной фазе BiFeO₃. Оставшиеся доли атомов железа относятся к магнитонеупорядоченным состояниям, характеризующимся дублетами. В образце 01S доля таких атомов железа составляет около 7%, в образце 05T - 2% (табл. 2).

Параметры дублета в образце 01S (IS = 0.35, QS = 0.75) совпадают с соответствующими параметрами для $BiFeO_3$ с размерами кристаллитов менее 14 нм [5]. В образце 05T параметры дублета ($IS \approx 0$, QS = 0.65) существенно от них отличаются. При этом величина изомерного сдвига дублета $IS \approx 0$ образца 05T не позволяет отнести это состояние железа к нанокристаллам $BiFeO_3$. Можно предположить, что это состояние отвечает малым



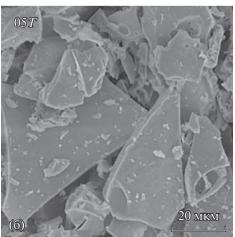


Рис. 3. СЭМ-изображения образцов 01S (a), 05T (б).

кластерам железа, образовавшимся в результате окислительно-восстановительной реакции на поверхности контакта нанокристаллического ортоферрита висмута и недоокисленных составляющих топлива, которые могли аккумулироваться в закрытых порах или просто на границах зерен BiFeO₃.

Кривые намагничивания M(H) образцов, термообработанных при 550°C, приведены на рис. 5. Видно, что гистерезис наблюдается при всех температурах, указывая на существование магнитного порядка в достаточно широком температурном интервале. Однако вид этих зависимостей и характеризующие их численные параметры существенно различаются. Кривые M(H) образца 05Tимеют широкую петлю гистерезиса с высокой остаточной намагниченностью, величина которой $M_r \approx 0.5$ эме/г (при T = 400 K). Напротив, образец 01S демонстрирует низкую намагниченность и узкую петлю. Насыщение у образца 05Tхорошо заметно при всех температурах, а у 01S в изученном диапазоне полей оно не достигается, причем в последнем случае вид зависимости M(H) сходен с описанным в работах [10, 11] для синтезированных методом глицин-нитратного горения наночастиц BiFeO₃, имеющих $d \approx \lambda_c$.

Полученные нанокристаллы имеют размеры менее периода спиновой циклоиды ($d < \lambda_c$), что предполагает ее искажение и должно приводить к появлению ненулевой намагниченности. Изменение магнитного отклика материалов, синтезированных с использованием винной кислоты, авторы работ [10, 11] связывают преимущественно с размерным эффектом и наличием примесных фаз в образцах. В нашем случае, ввиду близости значений d у обоих образцов и отсутствия заметных количеств кристаллических примесных фаз, различный ход кривых M(H) только этим объясняться не может. Известно, однако, что в нанокристаллических материалах на основе BiFeO₃ вклад в общую намагниченность вносят не только иска-

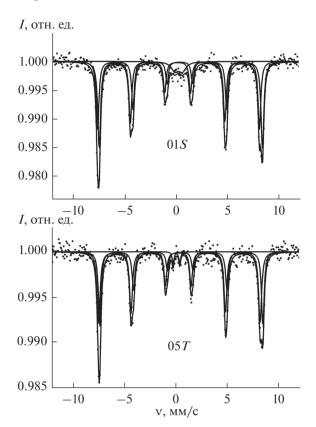


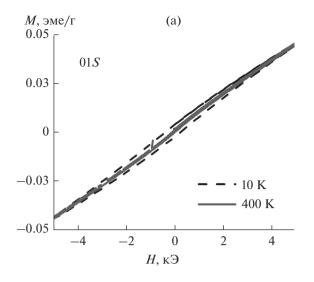
Рис. 4. Мессбауэровские спектры образцов.

жения спиновой циклоиды, но и поверхностные состояния нанокристаллов, включая примеси, локализованные на границах, которые в свою очередь в большой степени зависят от метода и условий синтеза. При образовании подобных рентгеноаморфных состояний вещества возможны кардинальные отличия в магнитном поведении материалов, полученных разными методами. Например, данные работ [8, 10, 11] показывают, что при различных условиях синтеза BiFeO_3 и при $d < \lambda_c$ разброс величины M составляет несколько порядков.

Таблица 2. Параметры мессбауэровских спектров образцов

Образец	Компоненты спектра	$IS \pm 0.02$, mm/c	$QS \pm 0.03$, mm/c	$H_{e\!f\!f}\pm 0.3,$ Тл	A, %
015	Дублет	0.35	0.75	_	7
	Секстет1	0.40	-0.31	49.2	53
	Секстет2	0.39	0.13	48.8	40
05 <i>T</i>	Дублет	0.08	0.65	_	2
	Секстет1	0.41	-0.30	49.2	54
	Секстет2	0.41	0.08	48.7	44

Примечание. IS — изомерный сдвиг, QS — квадрупольное расщепление, $H_{\it eff}$ — эффективное магнитное поле, A — отношение интегральных интенсивностей.



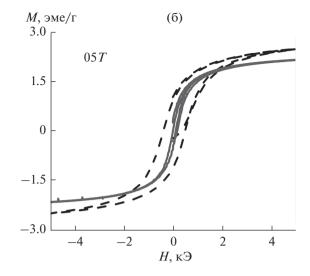


Рис. 5. Кривые намагничивания образцов 01S (a), 05T (б).

В рассматриваемом случае в качестве таких состояний могут выступать образующиеся в процессе растворного горения рентгеноаморфные кластеры, локализующиеся, например, на поверхности нанокристаллов и решающим образом влияющие на их магнитное поведение. Очень важным с точки зрения магнитных свойств и для данного метода синтеза плохо управляемым параметром может быть степень окисления элементов, входящих в состав данных кластеров.

В магнитоупорядоченном материале, несмотря на его структурированность на масштабах порядка нескольких десятков нанометров, в образованиях, более крупных чем кристаллиты, могут возникнуть доменные границы, определяющие процесс намагничивания. Параметры сформировавшейся доменной системы будут зависеть как от величины намагниченности материала, так и от характеристик крупных частиц. Последние в образце 05T имеют существенно большие размеры, чем в образце 01S (рис. 3), что может способствовать появлению развитой доменной структуры и, соответственно, более выраженной петли гистерезиса (рис. 5).

Таким образом, в работе показана существенная зависимость характеристик нанокристаллов $BiFeO_3$ от условий синтеза, что позволяет рассчитывать на возможность направленного изменения магнитных характеристик нанокристаллических материалов на основе $BiFeO_3$ в случае $d < \lambda_c$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом растворного горения с использованием в качестве топлива сахарозы и винной кислоты получены нанокристаллические порошковые ма-

териалы на основе BiFeO₃. Показано, что при комнатной температуре материал, синтезированный с использованием винной кислоты, имеет широкую петлю гистерезиса с остаточной намагниченностью $M_r \approx 0.5$ эме/г. Различие в магнитном отклике материалов связывается с влиянием технологически обусловленного изменения состояния рентгеноаморфных железосодержащих кластеров.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Рентгендифракционное исследование образцов выполнено в Инжиниринговом центре Санкт-Петер-бургского государственного технологического института (технического университета).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-13-10252).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Акбашев А.Р., Кауль А.Р.* Структурные и химические аспекты создания материалов со свойствами мультиферроиков // Успехи химии. 2011. Т. 80. № 12. С. 1211—1230. https://doi.org/10.1070/RC2011v080n12ABEH004239
- 2. *Калинкин А.Н., Поляков А.Е., Скориков В.М.* Дипольные вихри-скирмионы в мультиферроике BiFeO₃ // Неорган. материалы. 2013. Т. 49. № 3. С. 321—325. https://doi.org/10.7868/S0002337X13030068
- 3. Wu J., Fan Zh., Xiao D., Zhu J., Wang J. Multiferroic Bismuth Ferrite-Based Materials for Multifunctional Applications: Ceramic Bulks, Thin Films and Nanostructures // Prog. Mateer. Sci. 2016. V. 84. P. 335–402. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.09.001
- 4. Fischer P., Polomska M., Sosnowska I., Szymanski M. Temperature Dependence of the Crystal and Magnetic

- Structures of BiFeO $_3$ // J. Phys. C: Solid State Phys. 1980. V. 13. 1931—1940. https://doi.org/10.1088/0022-3719/13/10/012
- 5. *Кулагин Н.Е., Попков А.Ф., Звездин А.К.* Пространственно-модулированные антиферромагнитные структуры в легкоплоскостном мультиферроике // Физика твердого тела. 2011. Т. 53. № 5. С. 912—918. https://doi.org/10.1134/S1063783411050155
- Park T.-J., Papaefthymiou G.C., Viescas A.J., Moodenbaugh A.R., Wong S.S. Size-Dependent Magnetic Properties of Single-Crystalline Multiferroic BiFeO₃ Nanoparticles // Nano Lett. 2007. V. 7. P. 766–772. https://doi.org/10.1088/0953-8984/26/43/433202
- Castillo M.E., Shvartsman V.V., Gobeljic D., Gao Y., Landers J., Wende H., Lupascu D.C. Effect of Particle Size on Ferroelectric and Magnetic Properties of Bi-FeO₃ Nanopowders // Nanotechnology. 2013. V. 24. P. 355701-11. https://doi.org/10.1088/0957-4484/24/35/355701
- 8. *Hasan M., Islam Md.F., Mahbu R., Hossain Md.S., Hakim M.A.* A Soft Chemical Route to the Synthesis of BiFeO₃ Nanoparticles with Enhanced Magnetization // Mater. Res. Bull. 2016. V. 73. P. 179–1786. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2015.09.007
- 9. *Köferstein R*. Synthesis, Phase Evolution and Properties of Phase-Pure Nanocrystalline BiFeO₃ Prepared by a Starch-Based Combustion Method // J. Alloys Compd. 2014. V. 590. P. 324–330. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.12.120
- 10. Wang X., Zhang Y., Wu Z. Magnetic and Optical Properties of Multiferroic Bismuth Ferrite Nanoparticles by Tartaric Acid-Assisted Sol—Gel Strategy // Mater. Lett. 2010. V. 64. P. 486—488. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2009.11.059
- Ortiz-Quinonez J.L., Diaz D., Zumeta-Dube I., Arriola-Santamaría H., Betancourt I., Santiago-Jacinto P., Nava-Etzana N. Easy Synthesis of High-Purity BiFeO₃ Nanoparticles: New Insights Derived from the Structural, Optical, and Magnetic Characterization // Inorg. Chem. 2013. V. 52. P. 10306–10317. https://doi.org/10.1021/ic400627c
- 12. Lomanova N.A., Tomkovich M.V., Sokolov V.V., Ugolkov V.L., Panchuk V.V., Semenov V.G., Pleshakov I.V., Volkov M.P., Gusarov V.V. Thermal and Magnetic Behavior of BiFeO₃ Nanoparticles Prepared by Glycine-Nitrate Combustion // J. Nanopart. Res. 2018. V. 20. № 17. https://doi.org/10.1007/s11051-018-4125-6
- 13. Ломанова Н.А., Томкович М.В., Соколов В.В., Гусаров В.В. Особенности формирования нанокристаллического BiFeO₃ методом глицин-нитратного горения // Журн. общ. химии. 2016. Т. 86. С. 1605—1612. https://doi.org/10.1134/S1070363216100030
- Дмитриев А.В., Владимирова Е.В., Кандауров М.В., Булдакова Л.Ю., Бакланова И.В., Кузнецов М.В. Фотокаталитические свойства полых сфер BiFeO₃ // Журн. прикл. химии. 2019. Т. 92. С. 95–103. https://doi.org/10.1134/s0044461819010134

- 15. Almjasheva O.V., Lomanova N.A., Popkov V.I., Proskurina O.V., Tugova E.A., Gusarov V.V. The Minimum Size of Oxide Nanocrystals: Phenomenological Thermodynamic vs Crystal-Chemical Approaches // Nanosyst. Phys. Chem. Math. 2019. V. 10. P. 428–437. https://doi.org/10.17586/2220-8054-2019-10-4-428-437
- Проскурина О.В., Ноговицин И.В., Ильина Т.С., Данилович Д.П., Абиев Р.Ш., Гусаров В.В. Формирование наночастиц ВiFeO₃ с использованием струйного микрореактора // Журн. общ. химии. 2018. Т. 10. С. 1699—1704. https://doi.org/10.1134/S1070363218100183
- 17. Егорышева А.В., Кувшинова Т.В., Володин В.Д., Эллерт О.Г., Ефимов Н.Н., Скориков В.М., Баранчиков А.Е., Новоторцев В.М. Синтез высокочистого нанокристаллического ВiFeO₃ // Неорган. материалы. 2013. Т. 49. № 3. С. 310—314. https://doi.org/10.1134/S0020168513030023
- Proskurina O.V., Abiev R.S., Danilovich D.P., Panchuk V.V., Semenov V.G., Nevedomsky V.N., Gusarov V.V. Formation of Nanocrystalline BiFeO₃ during Heat Treatment of Hydroxides co-Precipitated in an Impinging-Jets Microreactor // Chem. Eng. Process. 2019. V. 143. P. 107598-10. https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107598
- Wang J., Wei Y., Zhang J., Ji L., Huang Y., Chen Z. Synthesis of Pure-Phase BiFeO₃ Nanopowder by Nitric Acid-Assisted Gel // Mater. Lett. 2014. V. 124. P. 242–244. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.03.105
- Cristobal A.A., Botta P.M. Mechanochemically Assisted Synthesis of Nanocrystalline BiFeO₃ // Mater. Chem. Phys. 2013. V. 139. P. 931–935. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2013.02.058
- 21. *Ломанова Н.А., Гусаров В.В.* Влияние поверхностного плавления на образование и рост нанокристаллов в системе Bi₂O₃−Fe₂O₃ // Журн. общ. химии. 2013. Т. 83. № 12. С. 1964—1966. https://doi.org/10.1134/S1070363213120049
- 22. *Aruna S.T., Mukasyan A.S.* Combustion Synthesis and Nanomaterials // Curr. Opin. Solid State Mater. Sci. 2008. V. 12. P. 44–50. https://doi.org/10.1016/j.cossms.2008.12.002
- 23. Popkov V.I., Almjasheva O.V., Nevedomskiy V.N., Panchuk V.V., Semenov V.G., Gusarov V.V. Effect of Spatial Constraints on the Phase Evolution of YFeO₃-Based Nanopowders under Heat Treatment of Glycine-Nitrate Combustion Products // Ceram. Int. 2018. V. 44. № 17. P. 20906—20912. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.097
- 24. *Карпов О.Н., Томкович М.В., Тугова Е.А.* Формирование нанокристаллов Nd_(1-х)Bi_хFeO₃ в условиях глицин-нитратного синтеза // Журн. общ. химии. 2018. Т. 88. № 10. С. 1692—1698. https://doi.org/10.17586/2220-8054-2019-10-4-428-437
- 25. *Tugova E., Yastrebov S., Karpov O., Smith R.* NdFeO₃ Nanocrystals under Glycine Nitrate Combustion Formation // J. Cryst. Growth. 2017. V. 467. P. 88–92. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2017.03.022

- 26. Ломанова Н.А., Томкович М.В., Осипов А.В., Уголков В.Л., Данилович Д.П., Панчук В.В., Семенов В.Г., Гусаров В.В. Формирование нанокристаллов Ві_{1-х}Са_хFeO_{3-δ} в условиях глицин-нитратного горения // Журн. общ. химии. 2019. Т. 89. № 9. С. 1448—1456. https://doi.org/10.1134/S1070363219090196
- 27. Ломанова Н.А, Томкович М.В., Осипов А.В., Уголков В.Л. Синтез нанокристаллических материалов
- на основе системы Bi_2O_3 — TiO_2 // Журн. общ. химии. 2019. Т. 89. № 10. С. 1587—1594. https://doi.org/10.1134/S0044460X19100147
- 28. Lomanova N.A., Semenov V.G., Panchuk V.V., Gusarov V.V. Structural Changes in the Homologous Series of the Aurivillius Phases $Bi_{n+1}Fen_3Ti_3O_{3n+3}$ // J. Alloys Compd. 2012. V. 528. P. 103–108. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.03.040