

НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ГЕТЕРОГЕННЫЕ МУЛЬТИФЕРРОИКИ НА ОСНОВЕ ФЕРРИТА ИТТРИЯ (ЯДРО) С ОБОЛОЧКОЙ ЦИРКОНАТА (ТИТАНАТА) КАЛЬЦИЯ

© 2020 г. Е. И. Копейченко^{a,*}, И. Я. Миттова^a, Н. С. Перов^b, А. Т. Нгуен^c, В. О. Миттова^d,
Ю. А. Алехина^b, И. В. Салманов^a

^a Воронежский государственный университет, Университетская пл. 1, Воронеж, 394018 Россия

^b Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

^c Университет образования г. Хошимин, Хошимин, 720000 Вьетнам

^d Воронежский государственный медицинский университет имени Н. Н. Бурденко, Воронеж, 394036 Россия

*e-mail: korejchenko00@mail.ru

Поступило в Редакцию 31 января 2020 г.

После доработки 31 января 2020 г.

Принято к печати 6 февраля 2020 г.

Для нанопорошков $YFeO_3-CaZr(Ti)O_3$, синтезированных на основе метода последовательного осаждения при различном времени диспергирования, показано, что строение частиц соответствует модели ядро–оболочка сферической формы. Установлено, что синтезированные нанопорошки $YFeO_3-CaZr(Ti)O_3$ представляют собой отдельные фазы ортоферрита иттрия, цирконата (титаната) кальция. Помимо рефлексов целевых фаз, на дифрактограммах присутствует незначительное количество пиков, относящихся к оксидам металлов: TiO_2 (рутил), CaO , ZrO_2 . Материалы на основе $YFeO_3-CaZr(Ti)O_3$ являются магнитно мягкими.

Ключевые слова: золь-гель синтез, последовательное химическое осаждение, ядро–оболочка, ортоферрит иттрия, цирконат кальция, титанат кальция

DOI: 10.31857/S0044460X20060157

Наночастицы перовскитоподобных соединений $AFeO_3$ ($A = Y, La$) являются перспективными объектами в связи с наличием у них практически важных магнитных, электрических и каталитических свойств. Такие материалы характеризуются возможностью получения из них наночастиц композиционного строения типа ядро–оболочка, состоящих из кристаллического ядра с перовскитоподобной структурой и оболочки, толщина которой существенно меньше размера критического зародыша объемной фазы [1, 2]. Интерес к наноматериалам со структурой ядро–оболочка обусловлен возможностью обнаружения у них необычных свойств, так как характеристические размеры составляющих их компонентов сопоставимы с размерами критических зародышей для многих оксидных веществ [3–5].

Существует широкий спектр веществ, способных образовывать защитную оболочку на поверхности ядер, например, органические лиганды [6], полимеры [7], неорганические материалы (такие как диоксид кремния [8] и углерод [9]), а также ряд металлов (золото, серебро) [10].

Создание наночастиц типа ядро–оболочка, состоящих из магнитного ядра ($YFeO_3$) и сегнетоэлектрической оболочки ($CaZrO_3$ и $CaTiO_3$), в последнее десятилетие является одним из актуальных направлений химии и материаловедения [11–14]. Это объясняется сочетанием уникальных свойств таких частиц. В этих материалах удалось объединить свойства, характерные для каждого из классов в отдельности. К ним относятся спонтанная намагниченность, магнитострикция, спон-

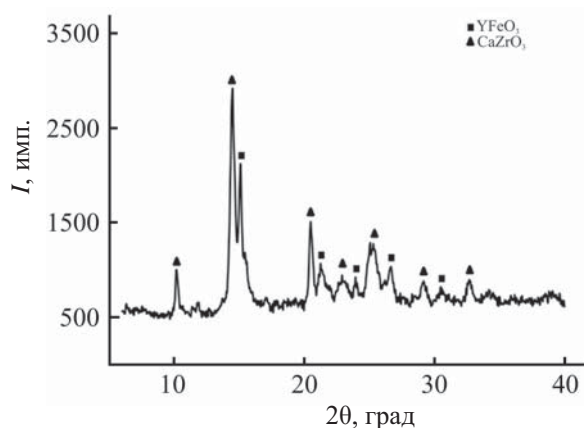


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма образца $\text{YFeO}_3\text{-CaZrO}_3$, полученного диспергированием YFeO_3 в течение 15 мин в воде и Pluronic® P-123, режим термического отжига – 1000°C , 120 мин.

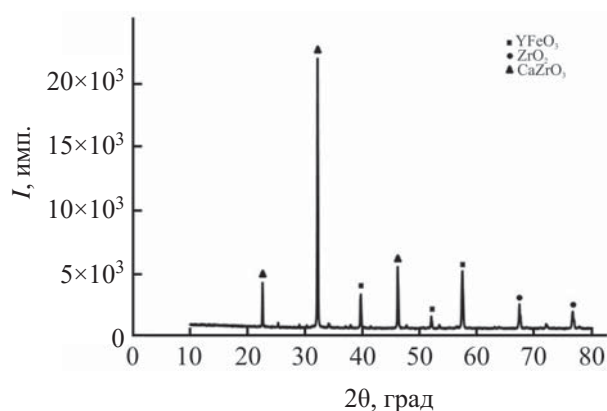


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма образца $\text{YFeO}_3\text{-CaZrO}_3$, полученного диспергированием YFeO_3 в течение 30 мин в изобутиловом спирте, режим термического отжига – 1000°C , 120 мин.

танная поляризация и пьезоэлектрический эффект [15–19].

Одним из наиболее простых и эффективных способов, позволяющих контролировать стехиометрический и фазовый состав синтезируемых образцов, снижать температуру синтеза целевого продукта, получать материал в различной форме, удобной для применения, является золь-гель технология [20]. Золь-гель метод также применяется для синтеза наночастиц со структурой ядро-оболочка. Наиболее простой вариант золь-гель процесса представляет собой совместное осаждение из раствора, содержащего соответствующие прекурсоры [21].

Целью данной работы являлся синтез частиц состава $\text{YFeO}_3\text{-CaZr(Ti)O}_3$ последовательным осаждением, их характеристика и определение магнитных свойств нанопорошков $\text{YFeO}_3\text{-CaZrO}_3$ и $\text{YFeO}_3\text{-CaTiO}_3$ со структурой ядро-оболочка.

Образец $\text{YFeO}_3\text{-CaZrO}_3$, полученный диспергированием YFeO_3 в водном растворе Pluronic® P-123 в течение 15 мин, состоит из отдельных фаз YFeO_3 (ядро) и CaZrO_3 (оболочка) и не содержит посторонних фаз (РФА) (рис. 1). Синтезированный в изобутиловом спирте в течение 30 мин образец представляет собой отдельные фазы YFeO_3 и CaZrO_3 , также присутствует примесь оксида циркония (ZrO_2) (рис. 2). Образец $\text{YFeO}_3\text{-CaTiO}_3$ после диспергирования в течение 15 мин в воде представляет собой многофазный продукт, содер-

жащий ортоферрит иттрия, титанат кальция и примеси CaO , TiO_2 со структурой рутила (рис. 3).

По данным просвечивающей электронной микроскопии, для образцов состава $\text{YFeO}_3\text{-CaZrO}_3$, синтезированных с предварительным диспергированием в водном растворе Pluronic® P-123 и изобутиловом спирте в течение 15 и 30 мин характерна структура ядро-оболочка: диаметр ядра ортоферрита иттрия равен 10–100 нм, а размер цирконата кальция (оболочка) – 8–9 нм.

Образец $\text{YFeO}_3\text{-CaTiO}_3$, диспергированный в течение 15 мин в воде, представляет собой совокупность кристаллитов, размер которых варьируется в диапазоне от 30 до 80 нм. Часть отдельных наночастиц имеет структуру ядро-оболочка с диа-

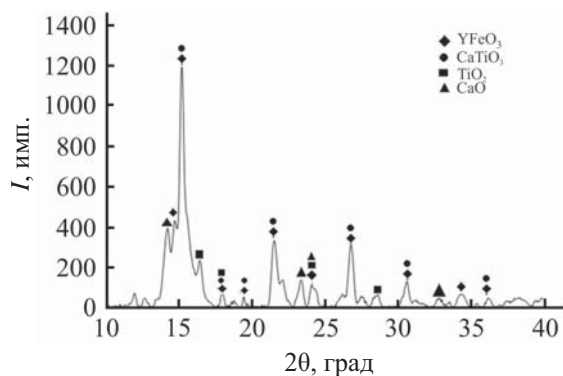


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма образца $\text{YFeO}_3\text{-CaTiO}_3$, полученного диспергированием YFeO_3 в течение 15 мин в воде, режим термического отжига – 750°C , 60 мин.

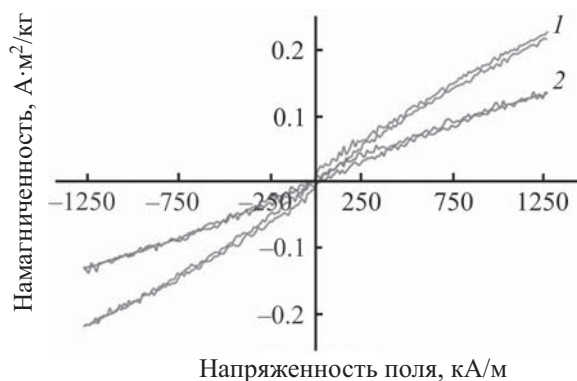


Рис. 4. Полевая зависимость намагниченности образца $\text{YFeO}_3\text{-CaZrO}_3$, полученного диспергированием YFeO_3 в течение 15 мин в воде и Pluronic® P-123, режим термического отжига – 1000°C , 120 мин. T , К: 1 – 100, 2 – 300.

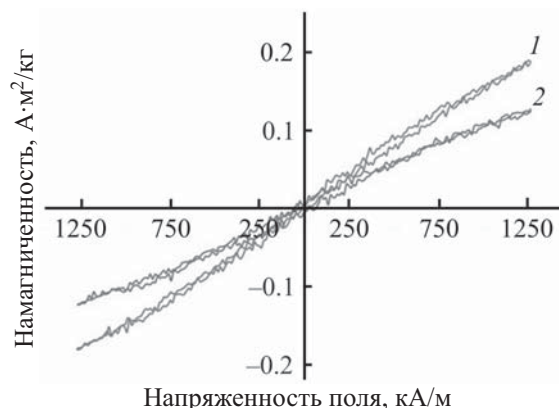


Рис. 5. Полевая зависимость намагниченности образца $\text{YFeO}_3\text{-CaZrO}_3$, полученного диспергированием YFeO_3 в течение 30 мин в изобутиловом спирте, режим термического отжига – 1000°C , 120 мин. T , К: 1 – 100, 2 – 300.

метром ядра порядка 30–40 нм, что коррелирует с результатами для частиц чистого феррита иттрия, синтезированного по методике [22], используемой нами для синтеза ядра. Общий размер структуры ядро–оболочка составляет 60–70 нм.

Исследование магнитных свойств образца $\text{YFeO}_3\text{-CaZrO}_3$, синтезированного в водном растворе Pluronic® P-123 с предварительным диспергированием YFeO_3 в воде в течение 15 мин, в поле до 1270 кА/м при 100 и 300 К показало, что значение удельной намагниченности (J) исследуемого образца уменьшается от 0.228 (100 К) до 0.135 $\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{кг}$ (300 К). Величина коэрцитивной силы (H_c), измеренная при 100 и 300 К, практически постоянна и составляет 14.3 кА/м (рис. 4). При этом характер кривых намагниченности исследуемого образца при 100 и 300 К отвечает магнитно мягкому материалу и характерно для суперпарамагнитных материалов.

Магнитные свойства образца $\text{YFeO}_3\text{-CaZrO}_3$, синтезированного с предварительным диспергированием в изобутиловом спирте в течение 30 мин, показало, что значение удельной намагниченности при 300 К оказалось несколько ниже (0.126 $\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{кг}$, рис. 5), чем у $\text{YFeO}_3\text{-CaZrO}_3$, синтезированного в водном растворе Pluronic® P-123 с предварительным диспергированием YFeO_3 в воде в течение 15 мин (рис. 4). Значения коэрцитивной силы исследованного образца зависят от температурных режимов: $H_c = 13.7$ кА/м при 100 К, т. е. анало-

гично таковому для предыдущего образца, а при 300 К значение коэрцитивной силы составляет 28.6 кА/м, превышая таковое для предыдущего образца примерно в 2 раза. Для исследуемого образца при 100 и 300 К наблюдаются узкие петли гистерезиса с линейной зависимостью намагниченности образца от приложенного магнитного поля, что свидетельствует о магнитно мягких свойствах материала и его суперпарамагнитном поведении во всем температурном диапазоне.

Для образца $\text{YFeO}_3\text{-CaTiO}_3$ (рис. 6), диспергированного в течение 15 мин в воде, величина

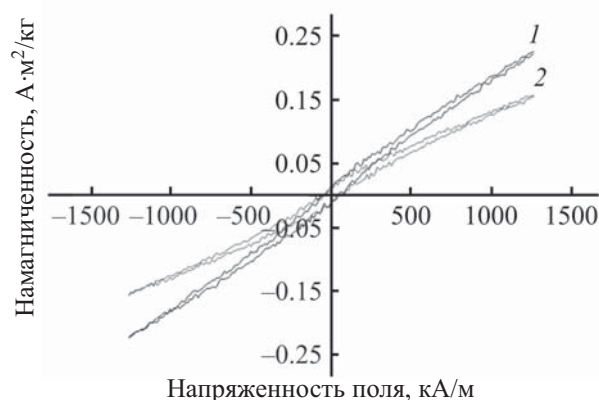


Рис. 6. Полевая зависимость намагниченности образца $\text{YFeO}_3\text{-CaTiO}_3$, полученного диспергированием YFeO_3 в течение 15 мин в воде, режим термического отжига – 750°C , 60 мин. T , К: 1 – 100, 2 – 300.

Сравнительный анализ магнитных свойств нанопорошков $\text{YFeO}_3\text{-CaZr(Ti)O}_3$ с YFeO_3

Образец	Растворитель	T , К	J , $\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{кг}$	M_s , $\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{кг}^a$	H_c , кА/м	Тип магнитного материала
$\text{YFeO}_3\text{-CaZrO}_3$	$\text{H}_2\text{O} + \text{Pluronic}^\circledR$ P-123	100	0.228	–	14.3	Магнитно мягкие ферромагнетики
		300	0.135	–	–	–
$\text{YFeO}_3\text{-CaZrO}_3$	$\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$	100	0.187	–	13.7	Магнитно мягкие ферромагнетики
		300	0.126	–	28.6	–
$\text{YFeO}_3\text{-CaTiO}_3$	H_2O	100	0.163	–	59	Магнитно мягкие ферромагнетики
		300	–	–	–	–
$\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeO}_3$ [22]	–	293	–	0.049	3.66	Магнитно мягкие ферромагнетики
$\text{Y}_{1-x}\text{Zn}_x\text{FeO}_3$ [23]	–	300	0.242	–	–	Магнитно мягкие ферромагнетики
$\text{Y}_{1-x}\text{Ba}_x\text{FeO}_3$ [25]	–	300	–	0.1	4.7	Магнитно мягкие ферромагнетики

^a Намагниченность насыщения.

намагниченности J составляет $0.163 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{кг}$, что меньше значения для чистого феррита иттрия, которое равно $J = 0.242 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{кг}$ [23]. Величина H_c равна 59 кА/м и значительно превышает таковую для недопированного YFeO_3 , которая равна 4 кА/м [24–25]. Аналогичная закономерность характерна для всех материалов-мультиферроиков со структурой ядро–оболочка в сравнении с чистой ферромагнитной фазой, которую можно считать эталонной [26–30]. Исходя из экспериментальных и литературных данных, можно сделать вывод об успешном формировании мультиферроика со структурой ядро–оболочка: оболочка (CaZrO_3 , CaTiO_3) создает в ядре дополнительные напряжения, которые увеличивают магнитокристаллическую анизотропию, поскольку уменьшается намагниченность и увеличивается значение коэрцитивной силы частиц $\text{YFeO}_3\text{-CaZr(Ti)O}_3$, что часто наблюдается в структурах типа ядро–оболочка по сравнению с чистым ферромагнитным материалом [31].

Сравнительный анализ синтезированных образцов $\text{YFeO}_3\text{-CaZr(Ti)O}_3$ со структурой ядро–оболочка с эталонной фазой ортоферрита иттрия представлен в таблице. Из таблицы следует, что по сравнению с чистым ферритом иттрия [22–25, 31] наблюдается уменьшение намагниченности и существенное увеличение значения коэрцитивной силы.

Таким образом, последовательным осаждением синтезированы наночастицы $\text{YFeO}_3\text{-CaZr(Ti)}$

O_3 со структурой ядро–оболочка. Согласно данным рентгенофазового анализа, синтезированные нанопорошки $\text{YFeO}_3\text{-CaZr(Ti)O}_3$ представляют собой отдельные фазы ортоферрита иттрия, цирконата (титаната) кальция. Помимо рефлексов целевых фаз, на дифрактограммах присутствует незначительное количество примесных пиков: TiO_2 (рутил), CaO , ZrO_2 . Методика предварительного диспергирования YFeO_3 в воде в течение 15 мин в водном растворе Pluronic®P-123 предпочтительнее, чем методика синтеза в изобутиловом спирте и воде с предварительным диспергированием YFeO_3 в течение 30 и 15 мин, соответственно, так как способствует формированию однофазного ядра (YFeO_3) и однофазной оболочки (CaZrO_3). Результаты измерения магнитных характеристик указывают на успешное формирование мультиферроиков $\text{YFeO}_3\text{-CaZr(Ti)O}_3$ со структурой ядро–оболочка.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для синтеза использовали следующие исходные вещества: $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Ч), $\text{Y}(\text{NO}_3)_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (ХЧ), NaHCO_3 (ХЧ), $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (Ч), $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (ЧДА), Na_2CO_3 (ХЧ), TiCl_4 (ХЧ).

Формирование наночастиц $\text{YFeO}_3\text{-CaZrO}_3$ и $\text{YFeO}_3\text{-CaTiO}_3$ со структурой ядро–оболочка проводили последовательным осаждением в два этапа.

Синтез ядра ортоферрита иттрия. Растворы нитратов железа(III) и иттрия готовили растворе-

нием соответствующих солей в дистиллированной воде (объемом 400 мл). В качестве осадителя для ортоферрита иттрия использовали гидрокарбонат натрия, поскольку он позволяет получить наночастицы меньшего размера [32]. Синтезированный осадок отфильтровывали, сушили при комнатной температуре до постоянной массы и прокаливали в муфельной печи при 750°C в течение часа.

Формирование оболочки. Второй этап синтеза заключался в осаждении компонентов оболочки на предварительно синтезированные наночастицы YFeO_3 в качестве центров осаждения. Для этого полученный на первом этапе порошок ортоферрита иттрия диспергировали в ультразвуковой ванне ВУ-09-Я-ФП-02 в течение 15 и 30 мин в различных растворителях: водном растворе Pluronic®P-123, воде и изобутиловом спирте. Выбор такого неионогенного ПАВ, как Pluronic® P-123, обусловлен тем, что он представляет собой блок-сополимер этиленоксида и пропиленоксида, который является неионогенным поверхностно-активным веществом. Это упрощает контроль протекания реакции и обеспечивает фазовую и химическую однородность. В сформированный таким образом раствор вводили прекурсоры, содержащие необходимые ионы (Ca^{2+} , Ti^{4+} , ZrO^{2+}), по каплям с постоянным перемешиванием механической мешалкой со скоростью 3000 об/мин, затем добавляли осадитель (Na_2CO_3) до образования гелеобразного осадка. Синтезированный гель отфильтровывали, сушили на воздухе при комнатной температуре и затем отжигали при 1000°C в течение 2 ч (CaZrO_3) или при 750°C в течение часа (CaTiO_3) для удаления воды и рекристаллизации аморфизованных осадков.

Фазовый состав синтезированных образцов устанавливали методом рентгенофазового анализа на дифрактометрах ДРОН-3 (MoK_α -излучение, $\lambda = 0.71075 \text{ \AA}$, $2\theta = 6\text{--}40^\circ$), RIGAKU SmartLab III (CuK_α -излучение, $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$, $2\theta = 20\text{--}60^\circ$), ЕМРУРЕАН (CuK_α -излучение, $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$, $2\theta = 10\text{--}90^\circ$). Размер и структуру частиц определяли посредством просвечивающего электронного микроскопа Carl Zeiss LIBRA 120.

Магнитометрию образцов и определение их магнитных характеристик осуществляли на вибрационном магнитометре LakeShore модель 7407. Образцы для исследования готовили следующим образом: взвешивали на аналитических ве-

сах пробы порошков массой 15–30 мг, запаковывали в микропакет из полиэтиленфталата, таким образом, что размеры получившегося образца не превышали $4 \times 6 \times 0.5$ мм. Соответствующий пакет закрепляли на держателе магнитометра с помощью клея БФ-6. Низкотемпературные измерения проводили в продувном азотном криостате марки 7401ВА. Калибровку магнитометра проводили по никелевому эталону с магнитным моментом $5.92 \text{ мА} \cdot \text{м}^2$ в поле 398 кА/м. Внешнее поле прикладывали в плоскости образца для минимизации влияния размагничивающего фактора.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Воронежского госуниверситета и кафедры магнетизма Московского госуниверситета им. М.В. Ломоносова (приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gusarov V.V.* // *Thermochim. Acta.* 1995. Vol. 256. N 2. P. 467. doi 10.1016/0040-6031(94)01993-Q
2. *Попков В.И., Альмяшева О.В.* // *ЖПХ.* 2014. Т. 87. № 2. С. 185; *Popkov V.I., Almyasheva O.V.* // *Russ. J. Appl. Chem.* 2014. Vol. 87. N 2. 167. doi 10.1134/S1070427214020074
3. *Смирнов А.В., Федоров Б.А., Томкович М.В., Альмяшева О.В., Гусаров В.В.* // *Докл. АН.* 2014. Т. 456. № 2. С. 171; *Smirnov A.V., Fedorov B.A., Tomkovich M.V., Al'myasheva O.V., Gusarov V.V.* // *Doklady Phys. Chem.* 2014. Vol. 458. P. 71. doi 10.1134/S0012501614050042
4. *Миттова И.Я., Сладкопеев Б.В., Миттова В.О., Nguyen A.T., Копейченко Е.И., Хороших Н.В., Варначкина И.А.* // *Конденс. среды и межфаз. гран.* 2019. Т. 21. № 3. С. 406. doi 10.17308/kcmf.2019.21/1156
5. *Larina L.L., Alexeeva O.V., Almyasheva O.V., Gusarov V.V., Kozlov S.S., Nikolskaia A.B., Vildanova M.F., Shevaleevskiy O.I.* // *Nanosystems: Phys. Chem. Math.* 2019. Vol. 10. N 1. P. 70. doi 10.17586/2220-8054-2019-10-1-70-75
6. *Рудаковская П.Г., Белоглазкина Е.К., Мажуга А.Г.* // *Вестн. МГУ.* Т. 40. № 3. С. 149; *Rudakovskaya P.G.,*

- Beloglazkina E.K., Majouga A.G.* // Moscow Univ. Chem. Bull. 2015. Vol. 70. N 3. P. 149. doi 10.3103/S0027131415030104
7. *Kwon T.W., Woo H.J., Kim Y.H., Lee H.J., Park K.H., Park S., Youn B.* // J. Nanosci. Nanotechnol. 2012. Vol. 12. N 8. P. 5920. doi 10.1166/jnn.2012.6433
 8. *Matveevskaya N.A., Tolmachev A.V., Pazura Yu.I., Savvin Yu.N.* // Funct. Mater. 2005. Vol. 12. N 2. P. 244. doi 10.1007/s12043-007-0128-z
 9. *Byeon J.H., Park J.H., Yoon K.Y.* // Nanoscale. 2009. Vol. 1. N 3. P. 339. doi 10.1039/B9NR00058E
 10. *Ko F.H., Tai M.R., Liu F.K., Chang Y.C.* // Sens. Actuators (B). 2015. Vol. 211. P. 283. doi 10.1039/B9NR00058E
 11. *Khomskii D.I.* // J. Magn. Magn. Mater. 2006. Vol. 306. N 1. P. 1. doi 10.1016/j.jmmm.2006.01.238
 12. *Didosyan Y.S., Hauser H., Nicolics J.* // J. Magn. Magn. Mater. 1999. Vol. 203. N 1. P. 247. doi 10.1016/S0304-8853(99)00273-5
 13. *Didosyan Y.S.* // Phys. Lett. (A). 1993. Vol. 176. N 5. P. 371. doi 10.1016/0375-9601(93)90935-S
 14. *Didosyan Y.S., Hauser H., Barash V.Y.* // J. Magn. Magn. Mater. 1998. Vol. 177. N 1. P. 203. doi 10.1016/S0304-8853(97)00251-5
 15. *Islam M.S., Davies R.A.* // Solid State Ionics. 2001. Vol. 145. N 1. P. 333. doi 10.1016/S0167-2738(01)00928-6
 16. *Andre R.S., Zanetti S.M.* // Ceram. Int. 2014. Vol. 40. N 10. P. 16627. doi 10.1016/j.ceramint.2014.08.023
 17. *Sales W.F., Oliveira A.R.* // Surf. Coat. Technol. 2016. Vol. 307. P. 1011. doi 10.1016/j.surfcoat.2016.10.028
 18. *Yanguang Q., Xiantao W., Yanguang Q.* // Curr. Appl. Phys. 2017. Vol. 17. N 1. P. 24. doi 10.1016/j.cap.2016.10.018
 19. *Rodionova V.V., Baraban I.A., Chichay K.A., Litvinova A.I., Perov N.S.* // J. Magn. Magn. Mater. 2017. Vol. 422. P. 216. doi 10.1016/j.jmmm.2016.08.082
 20. *Fahlman B.* Materials Chemistry. Amsterdam: Springer, 2011. 736 p. doi 10.1007/978-94-007-0693-4
 21. *Lima H.R.B.R., Nascimento D.S., Sussuchi E.M., Errico F.D., Souza S.O.* // J. Sol-Gel Sci. Technol. 2017. Vol. 81. N 3. P. 797. doi 10.1007/s10971-016-4249-z
 22. *Нгуен А. Т., Миттова И.Я., Солoduхин Д.О., Альмяшева О.В., Миттова В.О., Демидова С.Ю.* // ЖНХ. 2014. Т. 59. № 2. С.166; *Nguyen Anh Tien, Mittova I.Ya., Solodukhin D.O., Al'myasheva O.V., Mittova V.O., Demidova S.Yu.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2014. Vol. 59. P. 40. doi 10.1134/S0036023614020156
 23. *Бережная М.В., Миттова И.Я., Перов Н.С., Альмяшева О.В., Нгуен А.Т., Миттова В.О., Бессалова В.В., Вирютина Е.Л.* // ЖНХ. 2018. Т. 63. № 6. С. 1; *Berezhnaya M.V., Mittova I.Y., Perov N.S., Al'myasheva O.V., Nguyen A.T., Mittova V.O., Bessalova V.V., Viryutina E.L.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2018. Vol. 63. N 6. P. 1. doi 10.1134/S0036023618060049
 24. *Shang M., Zhang C., Yuan L.* // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 102. N 6. P. 62903. doi 10.1063/1.4791697
 25. *Бережная М.В., Альмяшева О.В., Миттова В.О., Нгуен А.Т., Миттова И.Я.* // ЖОХ. 2018. Т. 88. № 4. С. 539; *Berezhnaya M.V., Al'myasheva O.V., Mittova V.O., Nguyen A.T., Mittova I.Y.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2018. Vol. 88. N 4. P. 539. doi 10.1134/S1070363218060464
 26. *Sanchez-Andujar M., Mira J., Rivas J.* // J. Magn. Magn. Mater. 2003. Vol. 263. N 3. P. 282. doi 10.1016/S0304-8853(02)01576-7
 27. *Brink J.V.D., Khomskii D.I.* // J. Phys. Condens. Matter. 2008. Vol. 20. N 43. P.434217. doi 10.1088/0953-8984/20/43/434217
 28. *Нгуен А.Т., Альмяшева О.В., Миттова И.Я., Стогней О.В., Солдатенко С.А.* // Неорг. матер. 2009. Т. 45. № 11. С. 1392; *Nguyen Anh Tien, Almjashcheva O.V., Mittova I.Ya., Stogney O.V., Soldatenko S.A.* // Inorg. Mater. 2009. Vol. 45. P. 1304. doi 10.1134/S0020168509110211
 29. *Nguyen A.T., Pham Vinh N.T., Nguyen T., Tr L., Mittova V.O., Vo Q.M., Berezhnaya, M.V., Mittova I.Ya., Do Tr.H., Chau H.D.* // Solid State Sci. 2019. Vol. 96. P. 105922. doi 10.1016/j.solidstatesciences.2019.06.011
 30. *Popkov V.I., Almjashcheva O.V., Semenova A.S., Kellerman D.G., Nevedomskiy V.N., Gusev V.V.* // J. Mater. Sci. Mater. Electron. 2017. Vol. 28. N 10. P. 7163. doi 10.1007/s10854-017-6676-1
 31. *Shen H., Xu J., Jin M., Jiang G.* // Ceram. Int. 2012. Vol. 38. P. 1473. doi 10.1016/j.ceramint.2011.09.030
 32. *Динь В.Т., Миттова В.О., Федчук И.В., Миттова И.Я.* // Конденс. среды и межфаз. гран. 2011. Т. 13. № 1. С. 42.

Nanocrystal Heterogeneous Multiferroics Based on Yttrium Ferrite (Core) with Calcium Zirconate (Titanate) Shell

E. I. Kopeychenko^{a,*}, I. Ya. Mittova^a, N. S. Perov^b, A. T. Nguyen^c, V. O. Mittova^d,
Yu. A. Alekhina^b, and I. V. Salmanov^a

^a Voronezh State University, Voronezh, 394018 Russia

^b M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

^c Ho Chi Minh City University of Education, Ho Chi Minh City, 720000 Vietnam

^d N.N. Burdenko Voronezh State Medical University, Voronezh, 394036 Russia

*e-mail: kopeychenko00@mail.ru

Received January 31, 2020; revised January 31, 2020; accepted February 6, 2020

Nanocrystalline powders of $\text{YFeO}_3\text{-CaZr(Ti)O}_3$ were synthesized with subsequent chemical deposition method. $\text{YFeO}_3\text{-CaZr(Ti)O}_3$ nanocrystals have entity structure conformed to the spherical core-shell model. The synthesized nanocrystalline $\text{YFeO}_3\text{-CaZr(Ti)O}_3$ powders contain yttrium orthoferrite and calcium zirconate (titanate) single phases. Materials based on $\text{YFeO}_3\text{-CaZr(Ti)O}_3$ are magnetically soft.

Keywords: sol-gel synthesis, subsequent chemical deposition, core-shell, yttrium orthoferrite, calcium zirconate, calcium titanate