

ли при 300 °С на электроплите в течение 20 минут, пока цвет порошка не изменился с желтого на черный. Стабилизацию коллоидного раствора наночастиц феррита меди с концентрацией 1 г/л осуществляли добавлением 100 мкл 0,1 М однозамещенного цитрата натрия.

Прекурсор исследовали методами ТГА и ДСК. Термическое разложение полученного оксалата осуществляется в две стадии (рисунок 1, А). Первая стадия сопровождается потерей 18,5 % массы и эндотермическим эффектом (173,19 °С), что связано с удалением кристаллогидратной воды. Затем, безводная смесь разлагается в диапазоне температур от 220 °С до 270 °С (потеря 37,7 % массы образца). Следующим стадиям соответствуют совмещенные эндо- и экзотермические эффекты (разложение оксалатного прекурсора и окисление продуктов разложения кислородом воздуха, соответственно). Наблюдаем относительно низкую температуру разложения (до 300 °С) полученного оксалатного прекурсора.

Рентгенограмма прекурсора (рисунок 1, Б) соответствует рентгенограмме $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,

скорее всего, медь изоморфно замещает часть железа в данном оксалате. Отсутствие других пиков, не описываемых структурой оксалата железа, говорит о монофазном характере полученного прекурсора.

Согласно РФА продукт прокаливания соответствует фазе феррита меди кубической структуры. Размер ОКР составил 12 нм. Рефлекс при 38° отвечает фазе CuO (< 2 масс. %).

По результатам визуального наблюдения, золи стабильны в течение 60 минут, после чего частицы агломерируют и выпадают в осадок.

По данным DLS, среднее значение ζ -потенциала золь составляет –31 мВ (рисунок 1, Г), что может свидетельствовать о стабилизации за счет электростатического фактора. Отрицательное значение ζ -потенциала объясняется адсорбцией цитрат-ионов на поверхности наночастиц феррита меди. Среднее значение гидродинамического диаметра частиц составило 769 нм (рисунок 1, Д). Это значение соответствует размерам агрегатов наночастиц, которые содержатся в исследуемой суспензии.

Список литературы

1. Silva E., Brasileiro I. L., Madeira V. S., Farias B. A., Ramalho M. L. A., Rodriguez-Aguado E., Rodriguez-Castellon E. // *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020. – 8. – 5. – 104–132.
2. Lu J., Ma S., Sun J., Xia C., Liu Z., Wang Z., Zhao X., Gu Z. // *Biomaterials*, 2009. – 30. – 15. – 2919–2928.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ СИСТЕМЫ «ЯДРО-ОБОЛОЧКА» НА ОСНОВЕ MnFe_2O_4 И $\text{Ba}_{0,85}\text{Ca}_{0,15}\text{Zr}_{0,1}\text{Ti}_{0,9}\text{O}_3$

А. И. Бакшеев, Р. В. Чернозем, М. А. Сурменева, А. Л. Холкин
Научный руководитель – д.т.н., профессор Р. А. Сурменев

Томский политехнический университет
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30, artem27cc@gmail.com

Введение. В современной медицине развитие методов таргетной доставки лекарств имеет большой потенциал вследствие наличия большого спектра функциональных возможностей у носителей терапевтических препаратов, вследствие чего повышается эффективность лечения различного рода заболеваний. В свою очередь, применение магнитоэлектрических наночастиц

(МЭ НЧ) «ядро-оболочка» может позволить добиться высоких качественных результатов в области тераностики как способа доставки лекарств. Благодаря своей структуре МЭ НЧ, обладающие магнитоэлектрическими свойствами, могут быть покрыты биосовместимыми материалами, вследствие чего возможна безопасная и управляемая доставка препаратов строго к необ-

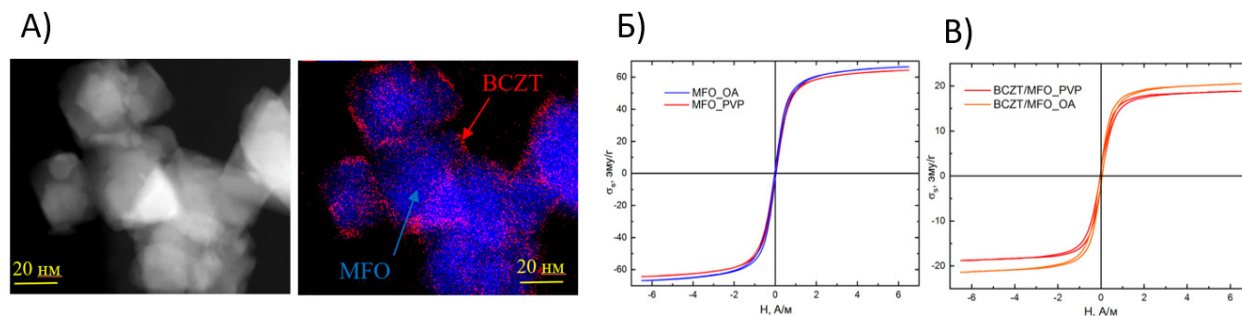


Рис. 1. ПЭМ-изображения МЭ НЧ на основе ядер, обработанных ОА

ходимым тканям. Также покрытие ядер оболочкой позволяет повысить их диспергируемость, конъюгацию с другими биоактивными молекулами, тепловую и химическую стабильность и т. д. [1]. Основной проблемой, возникающей при получении НЧ «ядро-оболочка», является потребность в максимально возможном сохранении магнитных свойств ядер и формировании структуры, обеспечивающей полное покрытие ядер оболочкой из необходимого материала. Вследствие этого, для определения применимости магнитоэлектрических НЧ из определенного материала в медицине, а также достижения максимальной эффективности при доставке терапевтических препаратов, необходимо провести анализ тонкой структуры на предмет взаимодействия материалов ядра и оболочки и установить проявление магнитных свойств.

Целью данной работы является получения МЭ НЧ, состоящих из ядер феррита марганца (MFO) и сегнетоэлектрической оболочки $\text{Ba}_{0,85}\text{Ca}_{0,15}\text{Zr}_{0,1}\text{Ti}_{0,9}\text{O}_3$ (BCZT), а также изучение магнитных свойств и тонкой структуры МЭ НЧ.

Материалы и методы. Для получения НЧ был использован гидротермальный метод. Синтез ядер проходил при температуре 200 °С в течение 3 часов. Для поддержания стабильности коллоидного раствора ядер была осуществлена обработка поливинилпирролидоном (PVP) и олеиновой кислотой (ОА). Синтез оболочки был осуществлен при той же температуре, но уже в течение 24 часов. Для анализа магнитных свойств полученных наночастиц использовался вибрационный магнитометр, а изучение струк-

туры производилось посредством просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Результаты. Результаты ПЭМ позволили подтвердить формирование тонкой оболочки BCZT на поверхности ядер MFO, функционализированных как ОА, так и PVP (рис. 1). Исследование магнитных свойств НЧ выявило снижение намагниченности насыщения MFO после формирования оболочки BCZT. Так, значения намагниченности для ядер, обработанных ОА и PVP, составили 66 ± 5 и 64 ± 5 эме/г, соответственно. В случае МЭ НЧ, полученных на основе обработанных ОА и PVP ядер, значение намагниченности составили 21 ± 2 и 19 ± 1 эме/г, соответственно. Данные показатели выше значений намагниченности насыщения для известных аналогов на основе потенциально токсичных материалов, например, МЭ НЧ с использованием ядер феррита кобальта CoFe_2O_4 , для которых намагниченность насыщения составляет 14,93 эме/г [2].

Закключение. Результаты проведенных исследований позволили установить успешное формирование структуры «ядро-оболочка» для наночастиц на основе MFO и BCZT. Установлена необходимость функционализации поверхности ядер MFO для формирования оболочки BCZT. Разработанные МЭ НЧ имеют высокую намагниченность насыщения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-588 от 1.06.2021), а также гранта РФФИ № 23-23-00511.

Список литературы

1. Krishnendu Chatterjee, Sreerupa Sarkar, K. Jagajjanani Rao, Santanu Paria / *Advances in Colloid and Interface Science*, 2014. – Vol. 209. – P. 8–39.
2. Ajith S. Kumar, C. S. Chitra Lekha, S. Vivek, Venkata Saravanan, K. Nandakumar, Swapna S. Nair / *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016. – Vol. 418. – P. 294–299.