

## МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ФЕРРИТ-ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

В настоящее время большое внимание уделяется поиску материалов, сочетающих в необходимой комбинации традиционные свойства (магнитные, пьезоэлектрические, диэлектрические), а также обладающих принципиально новыми (гибридными) свойствами [1, 2]. Магнитоэлектрические материалы (МЭ) отличаются большим разнообразием свойств и могут служить основой для разработки необходимых в современной СВЧ- и микроэлектронной технике функциональных приборов (модуляторов электромагнитных волн, элементов магнитной памяти и т.п.).

Однако большинство известных однофазных МЭ материалов (мультиферроиков) обнаруживают слабый магнитоэлектрический эффект, что делает такие материалы малопригодными для технического применения [3].

Следует ожидать, что композиционный материал, состоящий из ферритовой и пьезоэлектрической фаз, будет характеризоваться высокими магнитоэлектрическими коэффициентами, поскольку магнитоэлектрический коэффициент является результатом пьезомагнитной деформации и пьезоэлектрической генерации заряда.

В отличие от однофазных МЭ материалов магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах представляет собой так называемый "вторичный" эффект в цепочке "магнитострикция - упругая деформация - пьезоэлектрический эффект" и благодаря подбору компонентов с высокими магнитострикционными и пьезоэлектрическими константами удастся получить величину магнитоэлектрического эффекта, необходимую для практического использования.

В работе синтезированы композиционные МЭ материалы CF@PZT в виде керамических образцов высокой плотности, определены состав и структура полученных соединений, исследован магнитоэлектрический эффект в феррит-пьезоэлектрических композиционных материалах.

Синтез образцов состава  $(1-x)\text{PZT} + x\text{CF}$  с различным мольным соотношением исходных компонентов в интервале  $(0,1 < x < 0,5)$  проводили по стандартной керамической технологии на воздухе [4]. Полученную реакционную массу прессовали в виде цилиндрических образцов под давлением  $\sim 14$  МПа и отжигали при 1373 К в течение 1 ч.

Плотность полученной керамики не превышала ~85% от рентгеновской.

Контроль фазового состава и кристаллической структуры исследуемых образцов осуществляли рентгенографическими методами с применением порошкового дифрактометра Bruker D8 ADVANCE (CuK $\alpha$ -излучение).

Морфологию поверхности синтезированных соединений исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOLJSM-6510.

Исследование магнитоэлектрического эффекта проводили модуляционным методом, используя измерительную установку, содержащую электромагнит, источник постоянного тока, низкочастотный генератор АКТАКОМ AWG-4105, вольтметр универсальный цифровой GDM-78261.

Данные качественного рентгенофазового анализа позволили заключить, что при синтезе соединений композитной системы фазовый состав образцов не претерпевает существенных изменений – фазовый состав исходных компонентов (соединения PZT и CF) сохраняется (рис. 1, a, b), при этом интенсивность рентгеновских максимумов соответствует объемной доле компонентов гетерогенной системы (рис. 1, c).

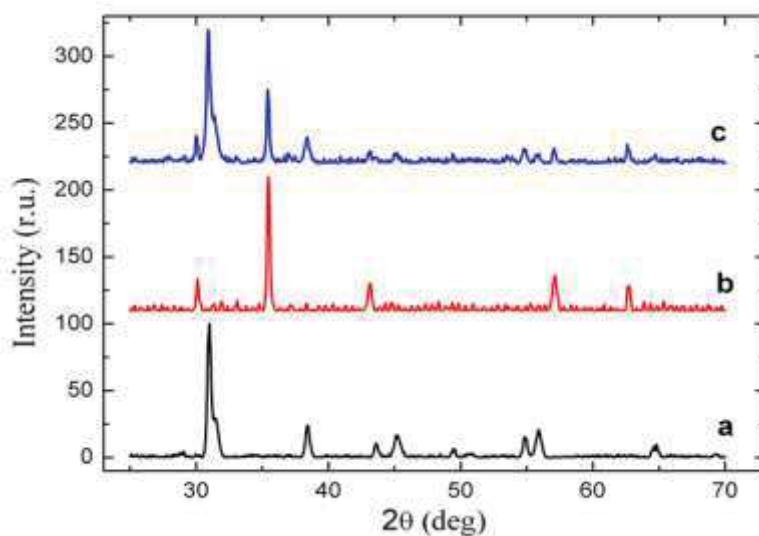


Рис. 1. Рентгенограммы соединений PZT (a), CF (b) и композита состава 0,6PZT + 0,4CF (c)

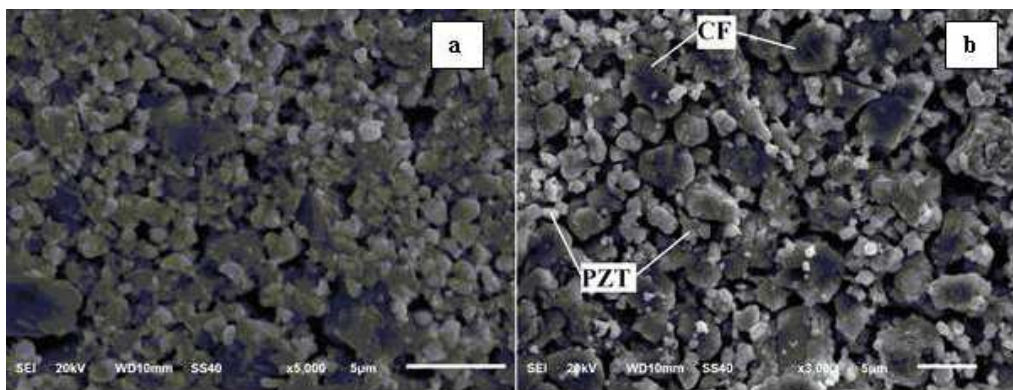


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения керамических композитов состава 0,8PZT + 0,2CF (a) и 0,7PZT + 0,3CF (b)

Анализ микроструктуры полученных композиционных материалов позволил установить тип взаимодействия между магнитной и электрической фазами посредством передачи упругих деформаций на границе кристаллитов (интерфейса). Исследование морфологии поверхности образцов (рис. 2) показало, что пьезокерамическая фаза PZT состоит из кристаллитов, имеющих форму многогранников, средний размер которых не превышает 2 мкм. Как видно из рис. 2, частицы PZT равномерно распределены по объему композита и встраиваются в межзеренную кристаллическую структуру ферромагнитного материала CF, размер кристаллитов варьируется от 5 до 7 мкм (рис. 2, b).

Установлено, что при внесении образца во внешнее магнитное поле поляризация в композите существенно изменяется, что обусловлено большой эффективной площадью соприкосновения между кристаллитами CF@PZT.

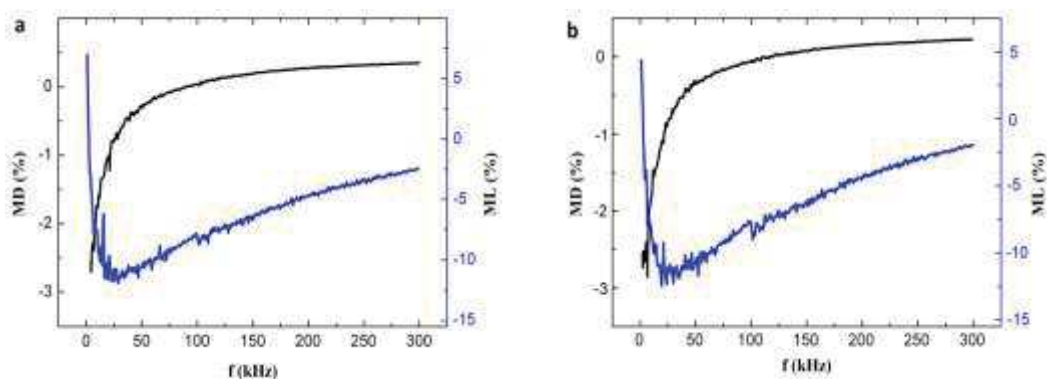


Рис. 3. Частотные зависимости магнитоэлектрического коэффициента для композита состава 0,6PZT + 0,4CF в поперечном магнитном поле 0,3Тл (a) и 0,6Тл (b)

Так, в интервале частот (0,5 - 300) кГц исследован магнитоэлектрический эффект при поперечной и продольной ориентации внешнего магнитного поля относительно электрического. Показано, что частотные зависимости магнитоэлектрического коэффициента для композитной системы  $(1-x)\text{PZT} + x\text{CF}$  ( $0,0 < x < 0,5$ ) не изменяются во всем исследуемом концентрационном интервале (рис. 3). При этом максимальные изменения диэлектрической проницаемости наблюдаются для образца с мольным соотношением ( $x = 0,4$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бичурин, М.И. Магнитоэлектрический эффект в магнитострикционно-пьезоэлектрических мультиферроиках / М.И. Бичурин, В.М. Петров // ФНТ. – 2010. – Т.36, № 6. – С. 680.
2. Калганов, Д.А. Структурные и диэлектрические свойства керамики феррониобата свинца / Д.А., Калганов, И.В. Бычков, А.А. Федий, И.А. Глушко // Вестник Челябинского государственного университета. – 2015. – № 7 (362). Физика. – Вып. 20. – С. 42.
3. Чупис, И.Е. Феноменологическая трактовка гиганского магнитоэлектрического эффекта в некоторых сегнетомагнетиках / И.Е. Чупис // ФНТ. – 2005. – Т.31, № 10. – С. 1125.
4. Лулицкая, Ю.А. Структура сегнетокерамических материалов  $\text{Ba}_x\text{Pb}_{1-x}\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$  / Ю.А. Лулицкая, А.М. Калимуллина, Д.А. Калганов // Челябинский физико-математический журнал. Серия «Физика». – 2018. – Т.3. – Вып. 2. – С. 219.