

ВЛИЯНИЕ МЕЖФАЗНЫХ ОБМЕННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОТКЛИК КОМПОЗИТНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ГИБКИХ НАНОГЕНЕРАТОРОВ

Ага-Тагиева С.Э.¹

Научный руководитель – канд. хим. наук Кладько Д.В.¹

¹Университет ИТМО

saga-tagieva@itmo.ru

Введение

Развитие гибкой электроники и автономных микросенсоров требует создания компактных источников питания, способных преобразовывать энергию внешних полей. Наногенераторы на основе магнитоэлектрических (МЭ) композитов привлекают внимание благодаря способности генерировать электрический заряд под действием переменного магнитного поля, что исключает необходимость в механическом контакте [1]. Традиционные ламинатные структуры обладают высоким МЭ-коэффициентом, но сложны в миниатюризации и подвержены расслоению. Композиты типа «ядро-оболочка» на основе пьезоэлектрических полимеров, таких как поливинилиденфторид (ПВДФ), позволяют создавать гибкие пленки с высоким соотношением поверхности к объему. Однако контроль над МЭ-откликом в таких системах остается сложной задачей. Перспективным подходом является использование обменных взаимодействий на границах раздела магнитных фаз для стабилизации магнитной структуры и усиления пьезоотклика [2].

Основная часть

В качестве модельных объектов синтезированы наночастицы типа «ядро-оболочка» с варьируемым составом: ферромагнетик/пьезоэлектрик ($\text{CoFe}_2\text{O}_4@ \text{BaTiO}_3$) и система с обменной пружиной/пьезоэлектрик ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}@ \text{CoFe}_2\text{O}_4@ \text{BaTiO}_3$). Синтез осуществлен золь-гель методом с последующим отжигом (600°C). Формирование оболочек контролировали изменением соотношения компонентов магнитного ядра к прекурсорам оболочки (1:1, 1:2, 2:1). Структурные исследования (РФА) подтвердили наличие обеих фаз без признаков химических примесей. Магнитометрия показала, что введение антиферромагнитной оболочки BaTiO_3 в состав CoFe_2O_4 приводит к росту коэрцитивной силы (с 136,9 до 155 мТл) и увеличению соотношения остаточной намагниченности к намагниченности насыщения M_r/M_s , что свидетельствует о проявлении обменного смещения. В то же время, в системе с обменной пружиной $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}@ \text{CoFe}_2\text{O}_4$ наблюдается сохранение высокой намагниченности насыщения ($M_s = 76 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$) при промежуточном значении коэрцитивной силы (125 мТл) относительно исходных компонентов (472,7 мТл для $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ и 136,9 мТл для CoFe_2O_4), что характерно для обменно-связанных жесткой и мягкой магнитных фаз. Для формирования наногенератора полученные частицы диспергированы в матрицу ПВДФ с последующим нанесением методом спин-коатинга (толщина пленки 150 мкм). В ходе испытаний макета наногенератора под действием переменного магнитного поля (0–200 Гц, 0–10 мТл) исследованы основные пики напряжения, силы тока и выходной мощности при варьировании нагрузки сопротивления.

Выводы

Предложенный подход к инженерии интерфейсов в наночастицах типа «ядро-оболочка» позволяет эффективно управлять магнитными свойствами композита. Экспериментально подтверждено, что наличие обменно-связанных слоёв в структуре типа «ядро-оболочка» увеличивает коэрцитивную силу и стабильность магнитной

подсистемы. В случае системы ферромагнетик/пьезоэлектрика это связано с проявлением эффекта обменного смещения на межфазной границе. Тогда как для системы с обменной пружиной усиление свойств обусловлено оптимизацией баланса между высокой коэрцитивностью жёсткой фазы ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, $H_c = 472,7$ мТл) и высокой намагниченностью мягкой фазы (CoFe_2O_4 , $M_s = 52$ А·м²/кг), что обеспечивает промежуточные значения коэрцитивной силы (125 мТл) при сохранении высокой намагниченности (76 А·м²/кг). Указанные механизмы приводят к усилению магнитоэлектрической связи в гибком композите на основе ПВДФ, что подтверждается ростом локального пьезоотклика и увеличением выходных параметров наногенератора. Полученные результаты открывают перспективы для создания высокочувствительных магнитных сенсоров и миниатюрных наногенераторов с улучшенными энергетическими характеристиками, работающих в слабых полях при комнатной температуре.

Литература

1. Prabhakaran T., Vivek Virendra Singh, Hemalatha J. Piezoelectric Polymer Nanocomposites for Energy Storage and Harvesting Applications // *Piezoelectric Polymers and Polymer Composites for Advanced Applications*. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. – P. 243–275.
2. Ram N., Pabba D.P., Kaarthik J., Hwang G.-T., Vaduganathan K., Venkateswarlu A. High output, biocompatible, fully flexible fiber-based magneto-mechano-electric generator for standalone-powered electronics // *Advanced Sustainable Systems*. – 2025. – Vol. 9, No. 1. – P. 2400548.