

## МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА, НАПОЛНЕННОГО СМЕСЬЮ ЧАСТИЦ $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{BaTiO}_3$

© 2025 г. А. А. Игнатов<sup>1,\*</sup>, О. В. Столбов<sup>1,2</sup>, Ю. Л. Райхер<sup>1,2</sup>, В. В. Родионова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», Калининград, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», Пермь, Россия

\*E-mail: artem.ignatov98@gmail.com

Поступила в редакцию 15.11.2024 г.

После доработки 14.12.2024 г.

Принята к публикации 30.12.2024 г.

Изучен магнитоэлектрический отклик композитного материала на основе резиноподобного полимера с наполнением частицами феррита кобальта и титаната бария субмикронных размеров. Методом компьютерного эксперимента исследуется зависимость магнитоэлектрического отклика репрезентативного объема такого композита от параметров системы. По результатам компьютерного эксперимента предложены способы усиления магнитоэлектрического отклика подобных композитов.

*Ключевые слова:* компьютерный эксперимент, магнитоэлектрический эффект, мультиферроидный композит.

DOI: 10.31857/S0367676525040139, EDN: GTPPEW

### ВВЕДЕНИЕ

Мультиферроики — это класс материалов, в которых существует как минимум два типа упорядоченных состояний: ферромагнитное и сегнетоэлектрическое либо ферроэластичное [1–3]. Когда в структуре материала совмещены и ферромагнитный, и сегнетоэлектрический порядки, это придает ему магнитоэлектрические (МЭ) свойства. Действительно, приложение внешнего магнитного поля изменяет электрическую поляризацию такой системы, а воздействие электрического поля заставляет ее изменять намагниченность. Эти два типа отклика известны под названиями прямого и обратного МЭ эффекта.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке новых композитных мультиферроиков с повышенным МЭ эффектом. В отношении величины последнего композитные системы превосходят однофазные мультиферроики на несколько порядков, так как в них реализована сильная механическая связь между сегнетоэлектрической и ферромагнитной фазами [1, 4–6]. Появление композитных МЭ материалов сделало возможным создание высококачественных сенсоров магнитного и электрического полей [7–12], в том числе и для биомедицинских приложений [13, 14] и для «energy harvesting» (сбор

«мусорной» энергии) [7, 15, 16]. Так, МЭ эффект, стимулируемый переменным полем, нашел свое применение в «умных» подложках, ускоряющих дифференциацию стволовых клеток [12].

При изготовлении МЭ композитов используют различные методы. Один из самых распространенных — склеивание плоскопараллельных пластин ферромагнитного и сегнетоэлектрического материалов [1]. Другой способ — спекание смеси микро- и/или наночастиц, помещенных в полимерную матрицу [1, 2, 17]. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. Первый — прост в реализации и позволяет получить высокие значения МЭ отклика; к его недостаткам относится, в частности, ограниченность форм готовых образцов, так как это должны быть только плоскопараллельные пластины. Второй метод дает меньшие значения МЭ эффекта, но его преимуществом является отсутствие ограничений на форму образцов [1].

Несмотря на то, что МЭ эффект в полимерных композитах заведомо ниже, чем в керамических, он отнюдь не слаб. С другой стороны, важным достоинством полимерных композитов является простота изготовления, гибкость и легкость в обработке [2, 17]. Кроме того, полимерным интерфейсам присуща хорошая биосовместимость.

Вместе, эти преимущества делают их уникальным средством для ряда биомедицинских приложений, где требуется использовать МЭ эффект. Например, создавать для культивирования бактериальных штаммов поверхности, на которых с помощью приложения внешнего магнитного поля дистанционно создаются контролируемый электрический заряд и механические напряжения [18, 19]).

При изготовлении МЭ композитов необходимо учитывать целый ряд факторов: тип, размер и концентрация ферромагнитных и сегнетоэлектрических частиц, механические свойства матрицы и другие [20]. Для предсказания свойств столь сложных многокомпонентных сред, вероятно, лучшим на текущий момент подходом является компьютерное моделирование [2, 21].

Современные компьютерные эксперименты, с помощью которых изучают полимерные мультиферроики, включают в себя, например, метод виртуальных пружин [2] (он хорошо себя зарекомендовал для описания магнитоактивных эластомеров) и метод конечных элементов [22]. Полномасштабное численное моделирование полимерных мультиферроиков предполагает рассмотрение больших ансамблей частиц и, соответственно, использование очень больших компьютерных ресурсов [2, 3, 6, 15, 21, 22]. Однако и моделирование систем с относительно малым количеством частиц способно – во всяком случае, на качественном уровне – продвинуть понимание того, как формируется отклик МЭ композита на приложенное поле. В настоящей работе рассмотрена, как пример представительного объема такого композита, система с тремя частицами субмикронного размера, из которых две ферромагнитны (феррит кобальта) и одна – сегнетоэлектрическая (титанат бария).

Главным предметом исследования является зависимость прямого МЭ эффекта в представительном объеме мультиферроидного композита от взаимного расположения фаз и ориентации их легких осей: намагниченности для ферромагнетиков и поляризации – для сегнетоэлектрика. Эластомерная матрица считается линейно-упругим несжимаемым континуумом с модулем Юнга = 1 МПа).

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Поскольку размеры частиц много больше размеров отдельных молекул, то для описания композитного материала используется мезоскопический подход, то есть, композит представляется системой частиц, погруженных в сплошную среду – матрицу.

Частицы считаются идеальными несжимаемыми сферами (окружностями, поскольку постановка задачи двумерная) с высоким модулем упругости (порядка единиц ГПа). Размер ферромагнитных частиц берется в 5–10 раз меньшим

по сравнению с размером сегнетоэлектрической частицы. Поскольку модули Юнга матрицы и частиц отличаются на несколько порядков, то для расчетов вполне допустимо использовать линейную теорию упругости [22].

В двумерной, как уже указано, постановке матрица задается в виде прямоугольника, размер которого намного превосходит любые суммарные размеры всех трех частиц; сами же частицы располагаются максимально далеко от границ матрицы. Одна (условно, нижняя) сторона матрицы жестко закреплена, остальные границы свободны.

Формулировка задачи подразумевает, что ферромагнитные и сегнетоэлектрические частицы, а также матрица, состоят из несжимаемых материалов; адгезия частиц обоих родов к матрице считается абсолютной. Принимается, что как ферромагнитные, так и сегнетоэлектрические частицы находятся в однодоменном состоянии. При этом частицы феррита считаются магнитостемками, то есть, изменение ориентации их магнитных моментов происходит только вместе с изменением ориентации самой частицы. Не учитываются ни магнитострикция частиц феррита, ни спонтанная поляризация сегнетоэлектрических частиц. Применяется квазистатическая постановка задачи, то есть, считается, что установление равновесия значения стационарных термодинамических параметров происходит значительно быстрее по сравнению характерным временем изменения внешнего магнитного поля. Это поле однородно и квазистационарно, внешнее электрическое поле отсутствует.

Рассмотрим соотношение, связывающее индуцированную электрическую поляризацию с приложенным механическим напряжением, вид этой зависимости указан в книге [23]:

$$D_i = D_{i0} + \varepsilon_{ik} E_k + 4\pi\gamma_{ik,l}\sigma_{kl}, \quad (1)$$

здесь  $\vec{D}$  – вектор электрической индукции,  $\vec{E}$  – вектор электрического поля внутри образца,  $\varepsilon_{ik}$  – тензор диэлектрической проницаемости образца,  $\gamma_{ik,l}$  – тензор пьезомодулей.

Поскольку прямой МЭ эффект в композите возникает за счет механического воздействия ферромагнитной фазы на сегнетоэлектрическую [6], то для моделирования прямого МЭ эффекта достаточно ограничиться в уравнении (1) учетом только третьего слагаемого:

$$D_i^{(\text{stress})} = 4\pi\gamma_{ik,l}\sigma_{kl}. \quad (2)$$

Соотношение (2) можно записать в векторном виде, принятом в физике пьезоэлектриков:

$$D_i^{(\text{stress})} = 4\pi d_{ik}t_k, \quad (3)$$

где  $d_{ik}$  – компонента прямоугольной матрицы  $3 \times 6$ , которая (матрица) является представлением тензора пьезомодулей,  $t_k$  – компонента

6-мерного вектора

$$\vec{r} = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{23} = \sigma_{32}, \sigma_{13} = \sigma_{31}, \sigma_{12} = \sigma_{21}), \quad (4)$$

которым можно заменить тензор механических напряжений в силу симметрии последнего. Такое представление формул (3) и (4) используется, например, в работах [4, 15, 16].

Согласно [24], в монокристаллах титаната бария матрица  $d_{ik}$  имеет следующий вид:

$$d_{ik} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

При переходе к двумерной постановке направим легкую ось поляризации вдоль  $Oy$  и учтем соотношение (5). Это дает

$$P_1 = d_{15}\sigma_{12}, \quad P_2 = d_{31}\sigma_{11} + d_{33}\sigma_{22}. \quad (6)$$

Тем самым, через пьезомодули титаната бария установлена связь механических напряжений с вектором поляризации.

Укажем соотношения, которым подчиняются переменные задачи. В приближении точечных диполей магнитное межчастичное взаимодействие описывается потенциалом

$$U_{ij}^{(dd)} = \frac{(\vec{m}_i \vec{m}_j)}{r_{ij}^3} - \frac{3(\vec{m}_i \vec{r}_{ij})(\vec{m}_j \vec{r}_{ij})}{r_{ij}^5}, \quad (7)$$

где  $\vec{m}$  – магнитный момент частицы,  $\vec{r}_{ij}$  – радиус-вектор расстояния между их центрами.

В принятой постановке задачи МЭ композит представляет собой сплошную среду с различными областями, каждая из которых характеризуется собственным набором материальных параметров. Поэтому для описания механических свойств такой среды воспользуемся тем, что тензор напряжений подчиняется уравнению равновесия во всех точках образца и на всех границах раздела:

$$\text{Div } \sigma_{ik} \equiv \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = 0. \quad (8)$$

Поскольку модуль упругости матрицы достаточно велик, то ее относительные деформации в рассматриваемом диапазоне полей малы, так что для описания механического поведения допустимо использовать изотропный закон Гука [25]:

$$u_{ik} = \mu_{iklm}\sigma_{lm},$$

$$u_{ik} = \frac{1}{2G} \left( \sigma_{ik} - \frac{1}{3}\sigma_{ll}\delta_{ik} \right) + \frac{1}{9K}\sigma_{ll}\delta_{ik}, \quad (9)$$

где  $\mu_{iklm}$  – общий вид тензора коэффициентов линейной податливости,  $G$  – модуль сдвига,  $K$  –

модуль всестороннего сжатия. Выразим из (9) компоненты тензора напряжений:

$$\sigma_{ik} = \lambda_{iklm}u_{lm},$$

$$\sigma_{ik} = 2Gu_{ik} + \left( K - \frac{2}{3}G \right) u_{ll}\delta_{ik}; \quad (10)$$

здесь  $\lambda_{iklm}$  – тензор модулей упругости.

Для решения задачи о квазистатическом МЭ эффекте использовался метод минимизации функционала свободной энергии системы. Получим выражение для этого функционала применительно к рассматриваемой системе. Согласно [18], приращение плотности свободной энергии пьезоэлектрика может быть представлено в виде (это видно и по размерности уравнения (11))

$$dF = -SdT + \sigma_{ik}du_{ik} - \frac{1}{4\pi}\vec{D}d\vec{E}, \quad (11)$$

где  $S$  – энтропия, а  $T$  – температура. Поскольку в постановке задачи внешнее электрическое поле отсутствует, то выражение (11) переходит в

$$d\tilde{F} = -SdT + \sigma_{ik}du_{ik}. \quad (12)$$

Подставляя в уравнение (12) уравнение (10) и интегрируя, получаем следующее выражение для плотности свободной энергии системы без учета энергии диполь-дипольного взаимодействия ферромагнитных частиц:

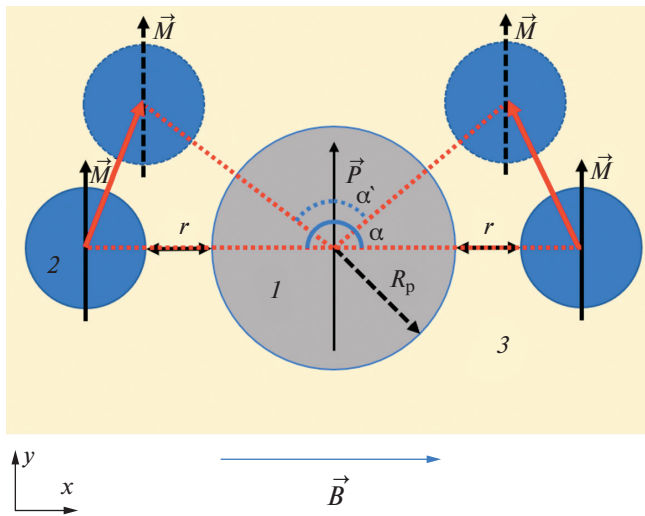
$$\tilde{F} = F_0 + G(u_{ik})^2 + \frac{1}{2} \left( K - \frac{2}{3}G \right) u_{ll}^2. \quad (13)$$

Поскольку рассматривается изотермическая ситуация, то слагаемое  $F_0$  в уравнении (13) – постоянная величина, которую при минимизации функционала учитывать не требуется. В этом случае, добавляя к (13) магнитную энергию, имеем

$$\tilde{F} = G(u_{ik})^2 + \frac{1}{2} \left( K - \frac{2}{3}G \right) u_{ll}^2 + U_{ij}^{(dd)}. \quad (14)$$

Для удобства моделирования выражение (14) следует сделать безразмерным. В качестве масштаба плотности энергии (модуля упругости) удобно выбрать величину  $G$ , то есть модуль сдвига матрицы. После проведение такого безразмеривания интеграл от выражения (14) по объему образца дает функционал энергии, который минимизируется. Из полученного решения с использованием выражения (6) рассчитывается электрическая поляризация композита.

Опишем входные параметры, которые служили входными данными выполненного расчета. Геометрическая схема рассматриваемой системы приведена на рис. 1. Как указано выше в качестве матрицы берется плотная резина с модулем



**Рис. 1.** Схематическое изображение репрезентативного объема. Здесь и далее: 1 – сегнетоэлектрическая частица, 2 – ферромагнитные частицы, 3 – электронейтральная матрица,  $\vec{M}$  – намагниченность ферромагнитных частиц,  $R_p$  – радиус сегнетоэлектрических частиц,  $R_m$  – радиус ферромагнитных частиц,  $\vec{P}$  – легкая ось поляризации сегнетоэлектрической частицы,  $r$  – зазор между ферромагнитной частицей и сегнетоэлектрической частицей.

сдвига  $G = 1$  МПа. Ферромагнитная фаза обладает характеристиками феррита кобальта, а сегнетоэлектрическая по свойствам соответствует титанату бария. Обе эти керамики имеют модуль Юнга порядка 100 ГПа. Спонтанная намагниченность частиц феррита кобальта принята равной 2500 А/м [19]. Диаметры ферромагнитных и сегнетоэлектрических частиц составляют 0.5 мкм и 3 мкм, соответственно; зазор между ферромагнитными и сегнетоэлектрической частицами равен 0.5 мкм; размеры матрицы – 12 на 24 мкм. Такие размеры матрицы необходимы для минимизации влияния границы матрица–«вакуум».

Для реализации программного кода был выбран язык программирования Python. Решение дифференциальных уравнений методом конечных элементов выполнялось с помощью пакета dolfin. При построении геометрии и генерации сетки использовался пакет mshr.

## РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Расчет проводился для магнитного поля в диапазоне 0 до 1 Тл, что покрывает практически все реальные сценарии использования МЭ композитов. Материальные параметры фаз (они частично указаны выше) выбирались согласно литературным данным.

В ходе компьютерного эксперимента был установлен линейный характер зависимости поляризации сегнетоэлектрической частицы во всем диапазоне магнитного поля. Для экономии вы-

числительных ресурсов при исследовании зависимости МЭ отклика от различных параметров системы были использованы небольшие значения магнитного поля – 50 мТл, так как для его достижения требуетсякратно меньше итераций, чем для достижения полей в единицы Тл при равном приращении поля. В численных экспериментах тех, где не изучалась зависимость от намагниченности частиц, ее величина составляла 2500 А/м (направление – всегда по оси  $Oy$ ).

Как видно из рис. 2а, зависимость поляризации сегнетоэлектрической частицы слабо зависит от зазора между сегнетоэлектрической и ферромагнитной частицами в выбранном диапазоне значений зазора. Так, при увеличении зазора в 20 раз, падение компоненты поляризации сегнетоэлектрической частицы составляет всего около 10%, а зависимость  $y$ -компоненты поляризации практически отсутствует. Также наблюдается преобладание  $x$ -компоненты поляризации, что объясняется преобладанием сдвиговых напряжений, как видно из выражения (6). Следовательно, наши результаты показывают, что основной механизм воздействия ферромагнитных частиц на матрицу в данном случае – поворот.

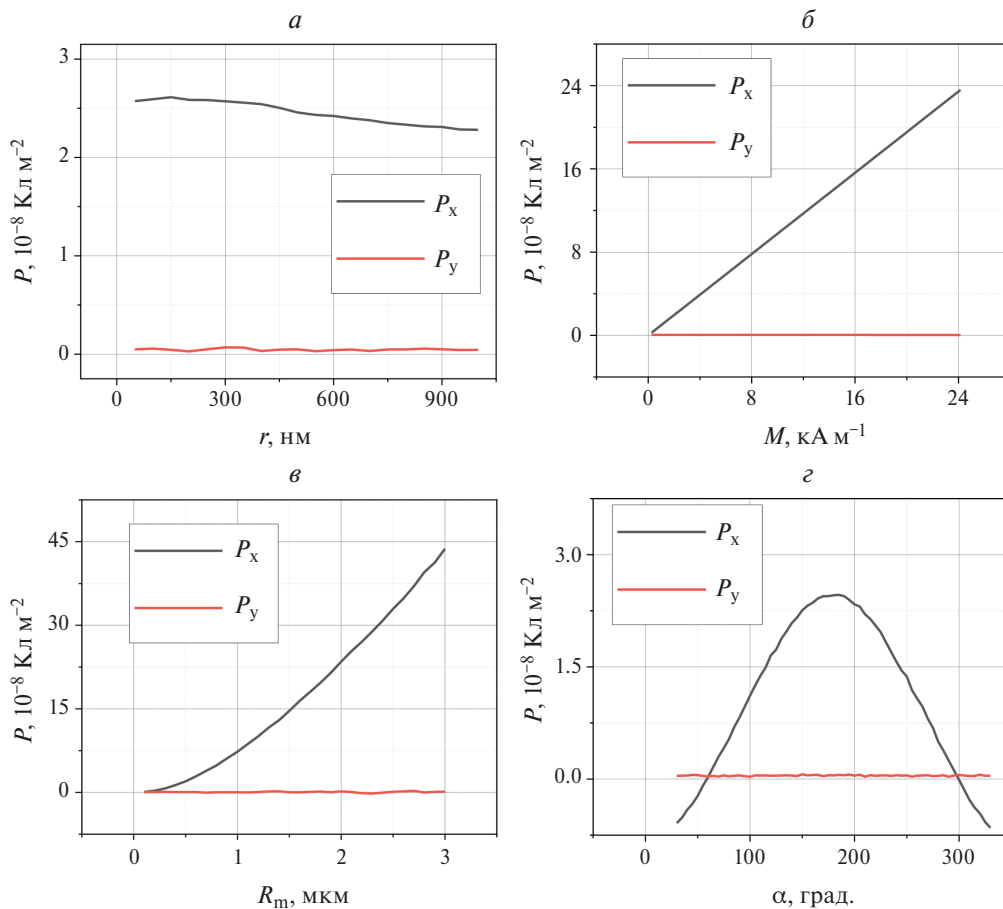
Как видно из рис. 2б, зависимость  $x$ -компоненты поляризации сегнетоэлектрической частицы от намагниченности ферромагнитных частиц линейна, а изменения  $y$ -компоненты малы. Преобладающая величина и линейность полевой зависимости  $x$ -компоненты объясняется, конечно, тем, что энергия Зеемана линейна по величине поля. Действительно,  $x$ -компонента поляризации возникает из-за сдвиговых напряжений, которые создают ферромагнитные частицы, на которые действуют моменты сил ( $\vec{m} \times \vec{B}$ ) линейные по полю.

Как показывает рис. 2в,  $x$ -компонента поляризации сегнетоэлектрической частицы нелинейно зависит от радиуса ферромагнитных частиц. Разумно предположить, что эта нелинейность, напоминающая параболу, обусловлена квадратичным (в двумерной постановке) ростом магнитного момента при изменении радиуса частицы.

Влияние коллективного эффекта (зависимость от конфигурации пары феррочастиц) иллюстрирует рис. 2г. Максимум МЭ отклика достигается при значении  $\alpha = 180^\circ$  (см. рис. 1) то есть в случае, когда пара феррочастиц расположена вдоль направления приложенного поля по разные стороны от сегнетоэлектрической частицы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из полученных зависимостей видно, что величина прямого МЭ эффекта при данных материальных параметрах фаз композита и конфигурации композита определяются поворотом ферромагнитных частиц, то есть сдвиговыми напряжениями. Сдвиговые напряжения индуцируют в сегнетоэлектрических частицах  $x$ -компоненту по-



**Рис. 2.** Зависимость компонент  $x$  и  $y$  поляризации  $\vec{P}$  от: зазора между ферромагнитными и сегнетоэлектрическими частицами (а); намагниченности частиц (б); радиуса ферромагнитных частиц (в); угла  $\alpha$  (см. рис. 1) (г).

ляризации, тогда как легкая ось поляризации, а значит и спонтанная часть поляризации, направлены по оси  $Oy$ . Отсюда следует, что такой вклад не только увеличивает поляризацию частицы, но также изменяет направление поляризации, что должно быть учтено при использовании такого материала. Также стоит отметить слабую зависимость величины МЭ эффекта от расстояния между частицами, что можно, на первый взгляд, трактовать как слабую зависимость величины МЭ отклика от концентрации сегнетоэлектрического и ферромагнитного наполнителей. Однако этот вывод нельзя считать полностью доказанным, принимая во внимание малость числа частиц в рассматриваемой системе. Действительно, судить о зависимости МЭ отклика от такой характеристики как концентрация можно только в компьютерном эксперименте, то есть изучая большой ансамбль частиц. Поэтому полученный результат может быть лишь указанием на возможность такой гипотезы, которую еще предстоит проверить компьютерным моделированием и натурным экспериментом.

Разработка математической модели была выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-72-30032). Реализация работ по проведению компьютерного эксперимента была поддержана из средств программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» БФУ им. И. Канта (научный проект № 123120700040-2).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dai J.* Ferroic materials for smart systems: From fundamentals to device applications. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2020. P. 259.
2. *Makarova L.A., Isaev D.A., Omelyanchik A.S. et al.* // *Polymers.* 2022. V. 14. No. 1. Art. No. 153.
3. *Stepanov G.V., Borin D.Yu., Raikher Yu.L. et al.* // *J. Phys. Cond. Matter.* 2008. V. 20. No. 20. Art. No. 204121.
4. *Date M., Kanamori J., Tachiki M.* // *J. Phys. Soc. Japan.* 1961. V. 16. No. 12. P. 2589.
5. *Амиров А.А., Каминский А.С., Архипова Е.А. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2023. Т. 87. № 6. С. 813; *Amirov A.A., Kaminskiy A.S., Arkhipova E.A. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2023. V. 87. No. 6. P. 715.
6. *Omelyanchik A., Antipova V., Gritsenko C. et al.* // *Nanomaterials.* 2021. V. 11. Art. No. 1154.

7. *Vida J.V., Turutin A.V., Kubas I.V. et al.* // IEEE T–UFFC. 2020. V. 67. P. 1219.
8. *Turutin A.V., Vidal J.V., Kubasov I.V. et al.* // J. Magn. Mater. 2019. V. 486. Art. No. 165209.
9. *Pereira N., Lima A.C., Correia V. et al.* // Materials. 2020. V. 13. Art. No. 1729.
10. *Jiang Q., Liu F., Yan H. et al.* // J. Amer. Ceram. Soc. 2011. V. 94. P. 2311.
11. *Stognij A.I., Novitskii N.N., Trukhanov S.V. et al.* // J. Magn. Mater. 2019. V. 485. P. 291.
12. *Zhang J., Li P., Wen Y. et al.* // Sens. Actuators A. Phys. 2014. V. 214. P. 149.
13. *Spaldin N.A.* // Science. 2005. V. 309. P. 391.
14. *Pereira N., Lima A.C., Lanceros-Mendez S., Martins P.* // Materials. 2020. V. 13. Art. No. 4033.
15. *Makarova L.A., Alekhina J., Isaev D. et al.* // J. Physics D. Appl. Phys. 2021. V. 54. No. 1. Art. No. 015003.
16. *Магомедов К.Э., Омелянчик А.С., Воронцов С.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 6. С. 819; *Magomedov K.E., Omelyanchik A.S., Vorontsov S.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 6. P. 720.
17. *Зубарев А.Ю., Искакова Л.Ю.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2024. Т. 88. № 4. С. 653; *Zubarev A.Y., Iskakov L.Y.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2024. V. 88. No. 4. P. 563.
18. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. 3. Электричество. Москва: Наука, 1982.
19. *Гайдук Ю.С., Коробко Е.В., Котиков Д.А. и др.* // Конденс. среды и межфаз. границы. 2022. Т. 24. № 1. С. 19.
20. *Kang S., Choi K., Nam J.D., Choi H.J.* // Materials. 2020. V. 13. Art. No. 4597.
21. *Saveliev D.V., Belyaeva I.A., Chashin D.V. et al.* // Materials. 2020. V. 13. Art. No. 3297.
22. *Столбов О.В., Райхер Ю.Л.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2024. Т. 88. № 4. С. 677; *Stolbov O.V., Raikher Yu.L.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2024. V. 88. No. 4. P. 586.
23. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. Москва: Наука, 1982.
24. *Желудев И.С.* Электрические кристаллы. М.: Наука, 1979.
25. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика сплошных сред. М.: Наука, 1982.

## Magnetoelectric response of a polymer composite filled with a mixture of $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{BaTiO}_3$ particles

A. A. Ignatov<sup>a,\*</sup>, O. V. Stolbov<sup>a,b</sup>, Yu. L. Raikher<sup>a,b</sup>, V. V. Rodionova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236001, Russia

<sup>b</sup>Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Science, Perm, 614013, Russia

\*e-mail: artem.ignatov98@gmail.com

We studied the magnetoelectric response of a composite material based on a rubber-like polymer filled with submicron-sized cobalt ferrite and barium titanate particles. Using a computer experiment, the dependence of the magnetoelectric response of a representative volume of such a composite on the system parameters is studied. Based on the results of the computer experiment, methods for enhancing the magnetoelectric response of such composites are proposed.

*Keywords:* computer experiment, magnetoelectric effect, multiferroic composite