

13

## Кольцевой магнитоэлектрический эффект в цилиндрических структурах пьезоэлектромагнитострикционных композитов при поперечном намагничивающем поле

© Gaojian Wu, Ru Zhang

Department of Physics, Nanjing Tech University, Nanjing, P.R. China  
E-mail: wugaojian@njtech.edu.cn

Поступило в Редакцию 14 июня 2022 г.

В окончательной редакции 1 августа 2022 г.

Принято к публикации 22 сентября 2022 г.

В присутствии поперечного намагничивающего поля в цилиндрических структурах композита PZT/Terfenol-D наблюдался сильный кольцевой магнитоэлектрический (МЭ) эффект. При постоянном намагничивающем поле, направленном вдоль оси цилиндра, и переменном намагничивающем поле, направленном по окружности, получено сильное МЭ-напряжение, равное  $0.93 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Oe}^{-1}$  при нерезонансной частоте 1 kHz и достигающее величины  $32 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Oe}^{-1}$  при резонансной частоте  $f_r = 46.0 \text{ kHz}$ . Эти величины намного выше наблюдаемых в плоских кольцевых структурах МЭ-ламината. Усиление кольцевого МЭ-эффекта соотносится с укреплением интерфейсного механического сцепления под воздействием нормальной составляющей напряжения. При комнатной температуре напряжение, индуцированное в данной цилиндрической композитной МЭ-структуре, проявляет почти линейную зависимость от амплитуды приложенного переменного вихревого магнитного поля в широком диапазоне магнитных полей ( $10^{-8} < H_{ac} < 10^{-5} \text{ T}$ ) как при низких частотах, так и на резонансной частоте. Кроме того, зависимость индуцированного напряжения от частоты приложенного переменного магнитного поля имеет почти идеально плоскую форму в диапазоне частот от единиц Hz до единиц kHz. Наличие сильного и устойчивого кольцевого МЭ-эффекта в цилиндрической слоистой МЭ-структуре обуславливает возможность ее применения в датчиках вихревого магнитного поля.

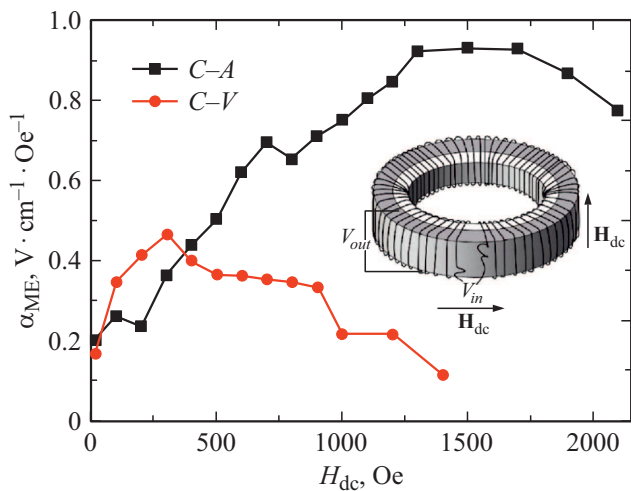
**Ключевые слова:** магнитоэлектрический эффект, пьезоэлектрик, частотная зависимость, датчик магнитного поля.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.24.54014.19280

В течение последних лет интерес к магнитоэлектрическому (МЭ) эффекту в структурах мультиферроических композитов постоянно возрастает в связи с возможностью их применения в магнитных датчиках, аккумуляторах и преобразователях энергии, а также в мощных миниатюрных трансформаторах [1,2]. Известно, что МЭ-эффект в слоистых мультиферроических композитах проявляется намного сильнее, чем в однофазных мультиферроиках, благодаря комбинации свойств пьезоэлектрической и магнитострикционной фаз [2]. В более ранних исследованиях основное внимание было обращено на МЭ-композиты с простой конфигурацией структуры: в форме прямоугольников, квадратов или дисков. Датчики магнитного поля на основе МЭ-эффекта при такой геометрии структур способны регистрировать магнитное поле только постоянного направления. Однако в некоторых областях исследования необходимо иметь возможность зондировать вихревое магнитное поле, возбуждаемое проводниками, несущими ток  $I$ , например в мощных интегральных схемах или в сверхпроводящих пленках [3]. Поэтому требуется разработка МЭ-ламинатов, применимых для регистрации вихревых магнитных полей. В работе Dong и др. был разработан датчик вихревого магнитного поля на основе кольцеобразной композитной МЭ-структуры, составленной из

кольца из магнитострикционного материала Terfenol-D, намагниченного по окружности, и кольца из пьезоэлектрического материала  $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  (PZT), поляризованного по окружности; чувствительность такого датчика к вихревому магнитному полю достигает высоких значений (до  $10^{-9} \text{ T}$ ) [4]. Однако в этой работе был предложен только прототип, реализация которого проблематична из-за необходимости обеспечения кольцевой поляризации и намагниченности. Кроме того, поскольку из-за сдвиговых напряжений в структуре механическое сцепление по границе между пьезоэлектрической и магнитострикционной фазами относительно слабое, выходное МЭ-напряжение такого датчика ограничено.

В последнее время все возрастающее внимание привлекают МЭ-композиты таких сложных конфигураций, как цилиндрические или тороидальные. Причина такого внимания — уникальные свойства этих структур, в частности обусловленная формой анизотропия, эффект самоограничения, повышенное механическое сцепление на межфазовой границе и замкнутая магнитная цепь. В работе Zhang и др. предлагается разработка трехслойного тороидального МЭ-гиратора (фазовращателя), состоящего из намагниченного по окружности феррита и поперечно поляризованных пьезоэлектриков и обладающего великолепными возможностями необратимо-



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента кольцевого МЭ-напряжения  $\alpha_{ME}$  от напряженности намагничивающего поля  $H_{dc}$  при частоте  $f = 1$  kHz в режимах  $C-A$  (намагничивающее поле параллельно оси цилиндра) и  $C-V$  (намагничивающее поле перпендикулярно оси цилиндра). На вставке показана условная схема измерений кольцевого МЭ-эффекта (серым цветом отмечено кольцо из PZT, белым — кольцо из Terfenol-D).

го преобразования напряжения в ток и обратимого преобразования импеданса [5]. В работе Savelev и др. предлагаются новые кольцеобразные МЭ-индукторы с регулировкой индукции в пределах 412% по электрическому полю и 1270% по магнитному полю [6]. В одной из наших последних публикаций сообщается о чрезвычайно сильном кольцевом МЭ-эффекте при низком оптимальном намагничивании в цилиндрическом композите PZT/Mn–Zn-феррит с постоянным полем намагничивания и переменным магнитным полем, направленными вдоль окружности [7]. В настоящей работе дано описание сильного кольцевого МЭ-эффекта в цилиндрической композитной структуре PZT/Terfenol-D с переменным кольцевым возбуждением и поперечным намагничиванием (переменное поле намагничивания параллельно или перпендикулярно оси цилиндра). Ожидается, что такие структуры найдут применение в качестве датчиков вихревого магнитного поля.

В качестве пьезоэлектрической и магнитострикционной фаз использовались материалы PZT и Terfenol-D соответственно. Кольцеобразный образец PZT промышленного производства с серебряными электродами, наклеенными на его верхнюю и нижнюю плоскости, был поляризован по толщине; внутренний диаметр кольца составлял 15.0 mm, наружный — 26.0 mm, а толщина образца равнялась 3.0 mm. Внутренняя поверхность кольца из PZT была аккуратно обработана наждачной бумагой для того, чтобы обеспечить хорошее соответствие размеров колец из Terfenol-D и PZT. Кольцеобразный образец промышленного производства из Terfenol-D с внутренним диаметром 8.2 mm вставлялся внутрь кольца

из PZT, и таким образом формировался двухслойный композит PZT/Terfenol-D цилиндрической формы. Воздушный зазор между кольцами из PZT и Terfenol-D заполнялся электроизолирующим клеящим составом. Для измерений МЭ-эффекта использовалось переменное напряжение частотой 1 kHz, поступающее от генератора сигналов; напряжение подавалось на обмотку вокруг цилиндрической композитной структуры, состоящую из 200 витков, при этом создавалось кольцевое переменное магнитное поле, измеряемое с помощью измерителя переменного магнитного поля на ответной катушке с таким же входным напряжением. Регулируемое постоянное поле намагничивания, генерируемое катушками Гельмгольца, прикладывалось параллельно или перпендикулярно оси цилиндра. Измерение частотной характеристики МЭ-эффекта проводилось с помощью синхронного усилителя (Zurich Instruments, UHF-DEV2031); при этом создавалось переменное напряжение с частотой  $f = 1-100$  kHz и амплитудой  $U = 1.5$  V, которое регистрировалось синхронным усилителем с входным сопротивлением 1 M $\Omega$ . Конфигурация образца и измерительная схема кольцевого МЭ-эффекта представлены на вставке к рис. 1.

На рис. 1 приведена зависимость коэффициента кольцевого МЭ-напряжения  $\alpha_{ME}$  ( $\alpha_{ME} = V_{ME}/t_p H_{ac}$ ,  $t_p$  — толщина кольца из PZT) от постоянного поля намагничивания при частоте переменного напряжения  $f = 1$  kHz в режимах  $C-A$  (намагничивание параллельно оси цилиндра) и  $C-V$  (намагничивание перпендикулярно оси цилиндра). Можно видеть, что зависимость величины  $\alpha_{ME}$  от  $H_{dc}$  подобна аналогичной зависимости, измеренной на планарных МЭ-композитах, или зависимостям от  $\alpha_{E,A}$  и  $\alpha_{E,V}$  для цилиндрических композитов, что хорошо соотносится с зависящим от поля намагничивания пьезомагнитным коэффициентом магнитострикционной фазы [8]. Разность между оптимальными значениями поля намагничивания в двух режимах порядка (1500 и 304 Oe для режимов  $C-A$  и  $C-V$  соответственно) может быть связана с влиянием фактора размагничивания [9]. Значение кольцевого МЭ-коэффициента при оптимальной напряженности поля намагничивания в рассматриваемом здесь цилиндрическом МЭ-композите при низкой частоте достигает  $0.93 V \cdot cm^{-1} \cdot Oe^{-1}$ , что намного выше соответствующего значения для кольцевого МЭ-ламината [4] (где максимальное значение коэффициента МЭ-напряжения составляет примерно  $0.26 V \cdot cm^{-1} \cdot Oe^{-1}$ , в то время как эффективная толщина кольца PZT намного превышает реальную под влиянием кольцевой направленности поляризации образца). Усиление МЭ-эффекта может быть связано с улучшением механического сцепления на межфазной границе и эффектом самоограничения, возникающими благодаря цилиндрической конфигурации композита. Считается, что полученный МЭ-эффект может быть впоследствии усилен за счет минимизации ширины зазора между кольцами PZT и Terfenol-D. Большое значение коэффициента показывает, что датчик на

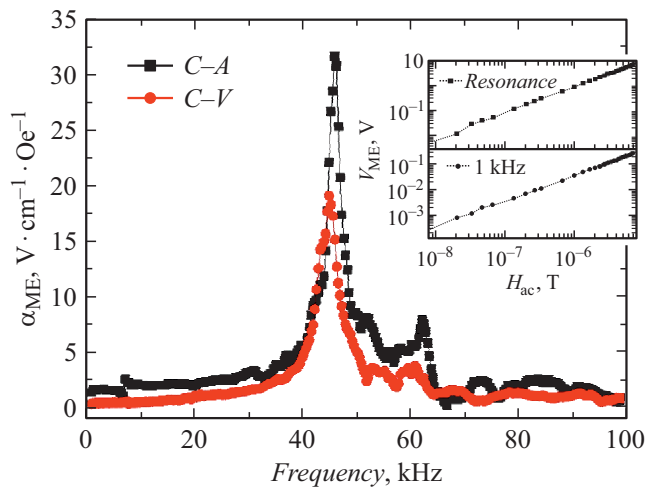
основе композита PZT/Terfenol-D обеспечивает высокие значения выходного напряжения при регистрации слабых  $H_{ac}$ .

Недавно в гетероструктуре, содержащей слои аморфного ферромагнетика FeBSiC и PZT, в условиях переменного возбуждающего поля, направленного перпендикулярно постоянному полю намагничивания, был обнаружен нелинейный МЭ-эффект [10]. В этом случае, т. е. при поперечном возбуждении, генерируются только четные гармоники, при этом амплитуда второй гармоники зависит от переменного возбуждающего поля квадратично. Было высказано предположение, что зависимость амплитуды второй гармоники от поля  $H_{dc}$  и возбуждающего поля  $H_{ac}$  определяется суммарным изменением поля на  $\delta H \approx H_{ac}^2/2H_{dc}$ . Напротив, в цилиндрической композитной структуре, рассматриваемой в настоящей работе, кольцевой МЭ-эффект с поперечным полем намагничивания имеет линейный характер (см. далее). В некоторых исследованиях, проведенных другими авторами, линейный МЭ-эффект с поперечным возбуждением наблюдался также в слоистых ферромагнитно-пьезоэлектрических композитах [11–13]. Возникновение линейного поперечного МЭ-эффекта может объясняться основными законами, действующими в магнитоэлектрических поликристаллических ферромагнитных материалах [14]. В общем случае в магнитоэлектрических материалах существует предпочтительное направление, в котором магнитоэлектрический коэффициент имеет относительно высокое значение. Благодаря поликристаллической структуре такие материалы и в других направлениях проявляют свойство магнитоэлектричности. При приложении постоянного магнитного поля удлинение одного из направлений приводит к сжатию другого. Тем не менее в некоторых материалах наблюдается также растягивание одновременно по всем направлениям; разница состоит только в величине растяжения. Влияние на магнитоэлектрические свойства магнитоэлектрических материалов не зависит от направления приложения поля намагничивания. Как правило, магнитоэлектрический эффект сильнее всего в том случае, когда напряженность постоянного поля принимает некое оптимальное значение. Под воздействием переменного магнитного поля магнитоэлектриция проявляется во всех направлениях с разными фазами. Следовательно, оптимальное значение поля намагничивания при максимальном МЭ-коэффициенте изменяется в зависимости от угла между направлениями поля намагничивания и переменного магнитного поля. Отметим, что в работе [10] амплитуда напряженности переменного магнитного поля составляет 20е; это значение сравнимо со значением для постоянного поля намагничивания  $H_{dc} \approx 11$  Ое, что может быть основной причиной наблюдаемой нелинейности МЭ-эффекта. Когда амплитуда напряженности переменного магнитного поля намного меньше, чем соответствующее значение для постоянного поля намагничивания, полученное в нашем эксперименте, может наблюдаться только линейный МЭ-эффект.

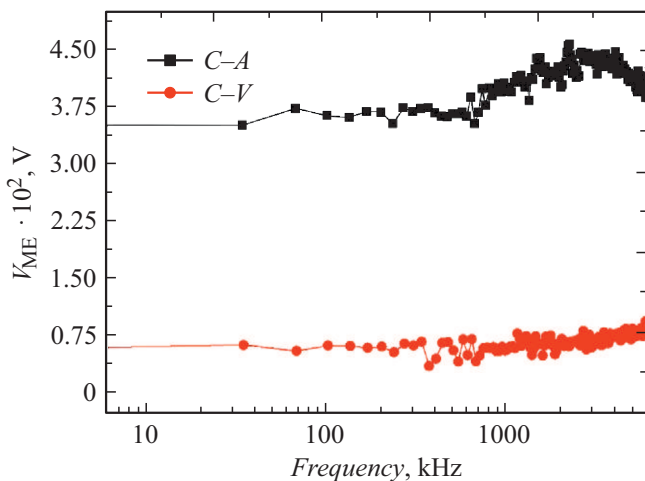
В нашей более ранней работе для описания кольцевого МЭ-эффекта при кольцевом возбуждении в цилиндрических композитных структурах была предложена теоретическая модель на основе материальных уравнений для пьезоэлектрической и магнитоэлектрической фаз и уравнения движения для сплошной среды [7]. Коэффициент МЭ-напряжения в цилиндрической композитной структуре описывается следующим выражением:

$$\alpha_{ME} = Ad_{mn}(q_{31} - q_{11}), \quad (1)$$

где  $A$  — постоянный коэффициент, зависящий от геометрических параметров и характеристик материалов структуры,  $d_{mn}$  — пьезомагнитный коэффициент магнитоэлектрической фазы. В предыдущем исследовании переменное поле намагничивания прикладывалось параллельно и перпендикулярно осям структур в виде кольцеобразных дисков или цилиндров с наложением на него переменного магнитного поля. МЭ-эффекты, возникающие в осевом и вертикальном режимах, определялись пьезомагнитными коэффициентами  $q_{31}$  и  $q_{11} + q_{12}$  соответственно. Поскольку благодаря влиянию фактора размагничивания коэффициент  $q_{11} + q_{12}$  обычно намного превышает  $q_{31}$ , величина  $\alpha_{E,V}$  для вертикального режима соответственно превышает  $\alpha_{E,A}$  для осевого режима [15,16]. Тем не менее наше исследование показало, что кольцевой МЭ-эффект в режиме  $C-A$  сильнее, чем в режиме  $C-V$  при соответствующих значениях оптимальных напряженностей полей намагничивания. Предполагается, что в основе механизма, ответственного за наблюдаемый результат, лежит динамическая пьезомагнитная деформация, зависящая от ориентации поля  $H_{dc}$  [17]. Из уравнения (1) следует, что МЭ-эффект в цилиндрических композитных структурах при кольцевом возбуждении определяется пьезомагнитным коэффициентом  $q_{31} - q_{11}$  независимо от того, направлено ли поле намагничивания  $H_{dc}$  параллельно или перпендикулярно оси. После приложения поля  $H_{dc}$  различной ориентации вращение магнитного домена и влияние размагничивания вызывают изменения величины  $B\mu$ , что приводит к возникновению в магнитоэлектрической фазе анизотропной динамической деформации. В каждом из двух режимов коэффициент  $q_{31} - q_{11}$  достигает максимального значения при соответствующих оптимальных значениях напряженности поля намагничивания. Однако в режиме  $C-A$  поле намагничивания  $H_{dc}$ , как и поле возбуждения  $H_{ac}$ , направлено всегда перпендикулярно плоскости структуры; в результате в одном и том же магнитоэлектрическом состоянии находятся различные части магнитоэлектрической фазы и, следовательно, эффективное значение пьезомагнитного коэффициента относительно велико. Напротив, из-за размагничивания значения внутреннего поля  $H_{in}$  в различных частях магнитоэлектрической фазы существенно отличаются друг от друга; кроме того, в режиме  $C-V$  угол между направлениями полей  $H_{dc}$  и  $H_{ac}$  значительно изменяется в зависимости от положения на плоскости, благодаря



**Рис. 2.** Частотная зависимость коэффициента  $\alpha_{ME}$  при оптимальных значениях  $H_{dc} = 1500$  Ое для режима  $C-A$  и  $H_{dc} = 304$  Ое для режима  $C-V$ . На вставке представлена зависимость наведенного МЭ-напряжения  $V_{ME}$  от амплитуды приложенного поля  $H_{ac}$  в режиме  $C-A$  при оптимальном поле намагничивания  $H_{dc} = 1500$  Ое при низкой частоте  $f = 1$  kHz и резонансной частоте  $f_r = 46$  kHz.



**Рис. 3.** Частотная зависимость наведенного МЭ-напряжения в диапазоне от 1 Hz до 6 kHz при постоянной амплитуде переменного магнитного поля  $H_{ac} = 0.1$  Ое для режимов  $C-A$  и  $C-V$ .

чему значение коэффициента  $q_{31} - q_{11}$  в этом режиме ниже, чем в режиме  $C-A$ , и, следовательно, кольцевой МЭ-эффект в режиме  $C-A$  сильнее, чем в режиме  $C-V$ .

На рис. 2 представлена экспериментально измеренная частотная зависимость  $\alpha_{ME}$  при оптимальных значениях напряженности поля  $H_{dc} = 1500$  Ое для режима  $C-A$  и  $H_{dc} = 304$  Ое для режима  $C-V$ . Резонансный коэффициент кольцевого МЭ-напряжения  $\alpha_{ME}$  в режиме  $C-A$  достигает значений до  $\sim 32$   $V \cdot cm^{-1} \cdot Oe^{-1}$ . Было обнаружено, что резонансные частоты в режимах  $C-A$  и  $C-V$  при соответствующих оптимальных полях намагничивания очень близки и соответствуют этой же

величине в режиме радиальных колебаний в области электромеханического резонанса. Резонансная частота радиальных колебаний для цилиндрической композитной структуры определяется выражением [16]:

$$f_r = \frac{1}{\pi D} \sqrt{\frac{1}{\bar{\rho} \bar{s}_{11}}}, \quad (2)$$

где  $D$  — средний диаметр,  $\bar{\rho}$  — усредненная массовая плотность. Величина  $\bar{s}_{11}$  эквивалентна коэффициенту податливости, который определяется выражением  $\bar{s}_{11} = \frac{p_{s_{11}} m_{s_{11}}}{v_m p_{s_{11}} + v_p m_{s_{11}}}$ , где  $v_p$  и  $v_m$  — объемные доли пьезоэлектрической и магнитострикционной фаз соответственно,  $p_{s_{11}}$  и  $m_{s_{11}}$  — коэффициенты податливости пьезоэлектрической и магнитострикционной фаз. В вычислениях использовались следующие значения параметров:  $p_{s_{11}} = 15.3 \cdot 10^{-12}$   $m^2/N$ ,  $p_{\rho} = 7.8 \cdot 10^3$   $kg/m^3$  (для PZT),  $m_{s_{11}} = 125 \cdot 10^{-12}$   $m^2/N$ ,  $m_{\rho} = 9.2 \cdot 10^3$   $kg/m^3$  (для Terfenol-D) [18,19]. Объемная доля материала PZT составляла примерно 0.74. Вычисленная резонансная частота составила 46.3 kHz, что хорошо согласуется с экспериментальным значением  $f_r = 46.0$  kHz.

Важным эксплуатационным параметром датчика магнитного поля является линейность зависимости выходного напряжения от амплитуды напряженности приложенного поля. На вставке к рис. 2 представлены данные измерений МЭ-напряжения как функции приложенного поля  $H_{ac}$  в диапазоне  $10^{-8} - 10^{-5}$  Т. Измерения проводились при комнатной температуре в отсутствие магнитного экранирования. Было обнаружено, что МЭ-напряжение линейно зависит от величины приложенного переменного магнитного поля в этом диапазоне как при низкой, так и при резонансной частоте, что указывает на высокую чувствительность слоистой цилиндрической композитной структуры PZT/Terfenol-D даже к низким значениям вариаций вихревого переменного магнитного поля.

На рис. 3 представлена частотная зависимость МЭ-напряжения в диапазоне от 1 Hz до 6 kHz при постоянной амплитуде  $H_{ac} = 0.1$  Ое для режимов  $C-A$  и  $C-V$ . Можно видеть, что наведенное напряжение практически не зависит от входной частоты переменного магнитного поля в диапазоне частот от единиц Hz до единиц kHz, что благоприятно для использования датчика вихревого магнитного поля, способного измерять переменное магнитное поле низкой и нестабильной частоты. Поскольку в случае датчика переменного магнитного поля на базе катушки с магнитным сопротивлением наведенное напряжение сильно зависит от частоты, сигнал не может регистрироваться катушкой из-за невысокой скорости изменения магнитного потока в катушке в условиях низкой частоты.

Отмечено наличие очень сильного кольцевого МЭ-эффекта в двухслойной цилиндрической композитной структуре PZT/Terfenol-D при поле намагничивания, направленном как параллельно, так и перпендикулярно оси цилиндра, и кольцевом направлении переменного

магнитного поля. МЭ-напряжение обладает высокой (до  $10^{-8}$  Т) чувствительностью к вихревому магнитному полю. Считается, что предел чувствительности может быть повышен до  $10^{-11}$ – $10^{-12}$  Т, если для производства и измерения сигнала напряжения переменного тока использовать более точный прибор, а также повысить качество подгонки размеров колец из PZT и Terfenol-D. МЭ-напряжение линейно зависит от амплитуды переменного магнитного поля в диапазоне магнитных полей  $10^{-8}$ – $10^{-5}$  Т и не зависит от частоты переменного магнитного поля в области низких частот от единиц Нз до единиц кНз. Ожидается, что верхний предел рабочего частотного диапазона будет увеличен до сотен кНз за счет уменьшения диаметра цилиндрической структуры МЭ-композиата, что особенно важно при работе в условиях высокой мощности. Все указанные достоинства в сочетании с легкостью изготовления делают цилиндрическую слоистую композитную структуру PZT/Terfenol-D весьма перспективной для построения чувствительных датчиков вихревого магнитного поля.

#### Финансирование работы

Финансовая поддержка исследования осуществлялась за счет Приоритетной академической программы развития Института высшего образования Цзянсу (Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institution, PAPD) и National Natural Science Foundation of China (грант № 51277098).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] W. Eerenstein, M. Wioral, J.L. Prieto, J.F. Scott, N.D. Mathur, *Nature Mater.*, **6**, 348 (2007). DOI: 10.1038/nmat1886
- [2] C.W. Nan, M.I. Bichurin, S.X. Dong, D. Viehland, G. Srinivasan, *J. Appl. Phys.*, **103**, 031101 (2008). DOI: 10.1063/1.2836410
- [3] G. Busatto, R.L. Capruccia, F. Iannuzzo, F. Velardi, R. Roncella, *Microelectron. Reliab.*, **3**, 577 (2003). DOI: 10.1016/S0026-2714(03)00024-6
- [4] S.X. Dong, J.F. Li, D. Viehland, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 2307 (2004). DOI: 10.1063/1.1791732
- [5] J. Zhang, B. Ge, Q. Zhang, D.A. Filippov, J. Wu, J. Tao, Z. Jia, L. Jiang, L. Cao, G. Srinivasan, *Appl. Phys. Lett.*, **118**, 042402 (2021). DOI: 10.1063/5.0038722
- [6] D.V. Savelev, L.Y. Fetisov, D.V. Chashin, Y.K. Fetisov, *IEEE Sens. Lett.*, **5**, 7003304 (2021). DOI: 10.1109/LESENS.2021.3119206
- [7] G.J. Wu, R. Zhang, *Sensors Actuators A*, **330**, 112845 (2021). DOI: 10.1016/j.sna.2021.112845
- [8] G. Sreenivasulu, S.K. Mandal, S. Bandekar, V.M. Petrov, G. Srinivasan, *Phys. Rev. B*, **84**, 144426 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevB.84.144426
- [9] V. Loyau, V. Morin, G. Chaplier, M. LoBue, F. Mazaleyrat, *J. Appl. Phys.*, **117**, 184102 (2015). DOI: 10.1063/1.4919722
- [10] D.A. Burdin, D.V. Chashin, N.A. Ekonomov, S.N. Gordeev, Y.K. Fetisov, *Appl. Phys. Lett.*, **116**, 072901 (2020). DOI: 10.1063/1.5136088
- [11] L.X. Bian, Y.M. Wen, P. Li, Y.F. Zhang, Q.L. Gao, *IEEE Trans. Magn.*, **45**, 2613 (2009). DOI: 10.1109/TMAG.2009.2018916
- [12] Z. Chen, Y. Su, S.A. Meguid, *J. Appl. Phys.*, **116**, 173910 (2014). DOI: 10.1063/1.4901069
- [13] H. Yao, Y. Shi, Y.W. Gao, *J. Appl. Phys.*, **118**, 234104 (2015). DOI: 10.1063/1.4938113
- [14] S. Chikazumi, *Physics of ferromagnetism*, 2nd ed. (Oxford University Press, Oxford, 1997).
- [15] D.A. Pan, Y. Bai, A.A. Volinsky, W.Y. Chu, L.J. Qiao, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 052904 (2008). DOI: 10.1063/1.2841709
- [16] W. Wu, K. Bi, Y.G. Wang, *J. Mater. Sci.*, **46**, 1602 (2011). DOI: 10.1007/s10853-010-4971-9
- [17] J. Zhang, K. Li, D. Chen, D.A. Filippov, Q. Zhang, S. Li, X. Peng, J. Wu, R. Timilsina, L. Cao, G. Srinivasan, *J. Electron. Mater.*, **49**, 1120 (2020). DOI: 10.1007/s11664-019-07713-6
- [18] M.I. Bichurin, D.A. Filippov, V.M. Petrov, V.M. Laletsin, N. Paddubnaya, G. Srinivasan, *Phys. Rev. B*, **68**, 132408 (2003). DOI: 10.1103/PhysRevB.68.132408
- [19] Y.M. Jia, S.W. Or, J. Wang, H.L.W. Chan, X.Y. Zhao, H.S. Luo, *J. Appl. Phys.*, **101**, 104103 (2007). DOI: 10.1063/1.2732420