

Магнитоэлектрический эффект в магнитоэлектрично-пьезоэлектрических мультиферроиках

М.И. Бичурин, В.М. Петров

*Новгородский государственный университет
ул. Б. С.-Петербургская, 41, г. Великий Новгород, 173003, Россия
E-mail: Mirza.Bichurin@novsu.ru*

Статья поступила в редакцию 29 октября 2009 г., после переработки 24 декабря 2009 г.

Дан анализ современного этапа изучения магнитоэлектрических (МЭ) композиционных мультиферроиков. В материалах такого рода МЭ эффект проявляется как следствие магнитоэлектричных и пьезоэлектрических свойств компонентов. Упругое механическое взаимодействие между магнитоэлектричной и пьезоэлектрической фазами дает гигантский магнитоэлектрический отклик в магнитоэлектрических композиционных материалах. Вблизи электромеханического резонанса МЭ эффект усиливается более чем в 100 раз. Интерес, связанный с возможностью построения интегральных устройств, вызывают недавно полученные наноструктурные композиты из сегнетоэлектрических и магнитных оксидов, выполненные в виде пленок на подложке. МЭ взаимодействие между сегнетоэлектрическими и магнитными оксидами, имеющими размеры порядка нанометров, такое же, как и у обычных композиционных материалов. Подобно объемным МЭ композитам, среди возможных применений МЭ эффекта в нанокompозитах следует указать датчики, преобразователи и разнообразные устройства чтения–записи.

Дано аналіз сучасного етапу вивчення магнітоелектричних (МЕ) композиційних мультиферроїків. У матеріалах такого роду МЕ ефект проявляється як наслідок магнітоелектричних та п'єзоелектричних властивостей компонентів. Пружна механічна взаємодія між магнітоелектричною та п'єзоелектричною фазами дає гігантський магнітоелектричний відгук у магнітоелектричних композиційних матеріалах. Поблизу електромеханічного резонансу МЕ ефект підсилюється більш ніж в 100 разів. Інтерес, пов'язаний з можливістю побудови інтегральних обладнань, викликають недавно отримані наноструктурні композити із сегнетоелектричних й магнітних оксидів, які виконано у вигляді плівок на підкладці. МЕ взаємодія між сегнетоелектричними й магнітними оксидами, що мають розміри порядку нанометрів, така ж, як і у звичайних композиційних матеріалів. Подібно об'ємним МЕ композитам, серед можливих застосувань МЕ ефекту в нанокompозитах слід указати датчики, перетворювачі й різноманітні обладнання читання–запису.

PACS: **75.80.+q** Магнитомеханические и магнитоэлектрические эффекты, магнитоэлектрика;
78.67.Pt Многослойники, сверхрешетки, фотонные структуры, метаматериалы;
76.50.+g Ферромагнитный, антиферромагнитный и ферримагнитный резонансы; спин-волновой резонанс.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, магнитоэлектрично-пьезоэлектрические мультиферроики, электромеханический резонанс, магнитный резонанс.

1. Введение

Исследованию физических свойств материалов, характеризующихся, как минимум, двумя типами упорядочения (сегнетоэлектрическим, ферромагнитным или упругим), т.е. мультиферроиков [1–3], уделяется заслуженное внимание благодаря возможности их при-

менения в технике для создания многофункциональных устройств. Благодаря взаимодействию между различными параметрами упорядочений в мультиферроиках могут появляться новые эффекты, например, магнитоэлектрический (МЭ) [4–9]. Одна из важных научных задач — исследование МЭ эффекта в мультиферроиках.

Магнитоэлектрический эффект представляет собой появление электрической поляризации \mathbf{P} под действием магнитного поля \mathbf{H} (т.е. прямой МЭ эффект, обозначаемый как МЭ_H: $\mathbf{P} = \alpha\mathbf{H}$) или появление намагниченности \mathbf{M} под действием электрического поля \mathbf{E} (т.е. обратный МЭ эффект, обозначаемый как МЭ_E: $\mathbf{M} = \alpha\mathbf{E}$). В некоторых природных материалах МЭ взаимодействие наблюдалось как внутренний эффект при низких температурах [4–6,10]. Интерес к МЭ эффекту обусловлен возможностью применения МЭ материалов в устройствах хранения информации, спинтроники и высокоскоростной памяти. В природе однофазные МЭ мультиферроики обладают относительно слабыми МЭ свойствами, при этом возможность работы только при низких температурах делают их мало пригодными для практического применения. В противоположность им композиционные МЭ мультиферроики, содержащие сегнетоэлектрическую и ферромагнитную фазы, обладают гигантскими МЭ характеристиками при комнатной температуре, что делает их перспективными для технических применений. Данная работа посвящена анализу современного этапа изучения МЭ композиционных мультиферроиков.

В противоположность однофазным материалам, в композитах МЭ взаимодействие между пьезоэлектрической и магнитной фазами приводит к большим значениям МЭ коэффициентов. В частности, полученные значения МЭ восприимчивости на несколько порядков больше, чем в известных однофазных МЭ материалах при комнатной температуре.

К настоящему времени исследованы различные системы возможных МЭ композитов, включая 1) объемные керамические МЭ композиты на основе пьезоэлектрических керамик и ферритов, например, цирконат-титанат свинца (ЦТС); 2) двухфазные МЭ композиты из магнитных сплавов и пьезоэлектрических материалов; 3) трехфазные МЭ композиты; 4) тонкие пленки

(наноструктурные композиты) из сегнетоэлектрических и магнитных оксидов. Структуры МЭ мультиферроиков из сегнетоэлектрической и магнитной фаз типа 0–3, 3–3, 2–2 и 1–3 [11] в настоящий момент разрабатываются и уже получены макеты МЭ устройств на основе МЭ композитов, обладающих большим МЭ эффектом при комнатной температуре.

2. Низкочастотный магнитоэлектрический эффект

Как и пьезоэлектрические композиты, МЭ композиты могут иметь различные схемы связности [11]. Самыми распространенными являются: 1) объемный композит, полученный из гранул пьезоэлектрических и магнитных оксидов, со связностью 0–3; 2) тип 2–2, имеющий место в слоистой композиционной керамике, состоящей из слоев пьезоэлектрических и магнитных оксидов; 3) тип 1–3, наблюдаемый в волокнистом композите, в котором волокна одной фазы внедрены в матрицу другой, как показано на рис. 1. Соединения ВаTiO₃, ЦТС, Pb(MgNb)O₃–PbTiO₃ и др., как правило, используются для пьезоэлектрической фазы; в роли магнитной фазы обычно выступают ферриты или магнитострикционные сплавы.

Уравнения для описания МЭ взаимодействия в композитах в линейном приближении могут быть записаны в виде

$$\sigma = cS - e^T E - q^T H, \quad (1)$$

$$D = eS + \varepsilon E + \alpha H, \quad (2)$$

$$B = qS + \alpha^T E + \mu H, \quad (3)$$

где σ , S , D , E , B и H — напряжение, деформация, электрическая индукция, электрическое поле, магнитная индукция, магнитное поле соответственно; c , ε и μ — коэффициент жесткости, диэлектрическая и магнитная проницаемости; e и q — пьезоэлектрический и пьезомагнитный коэффициенты; α — МЭ коэффициент.

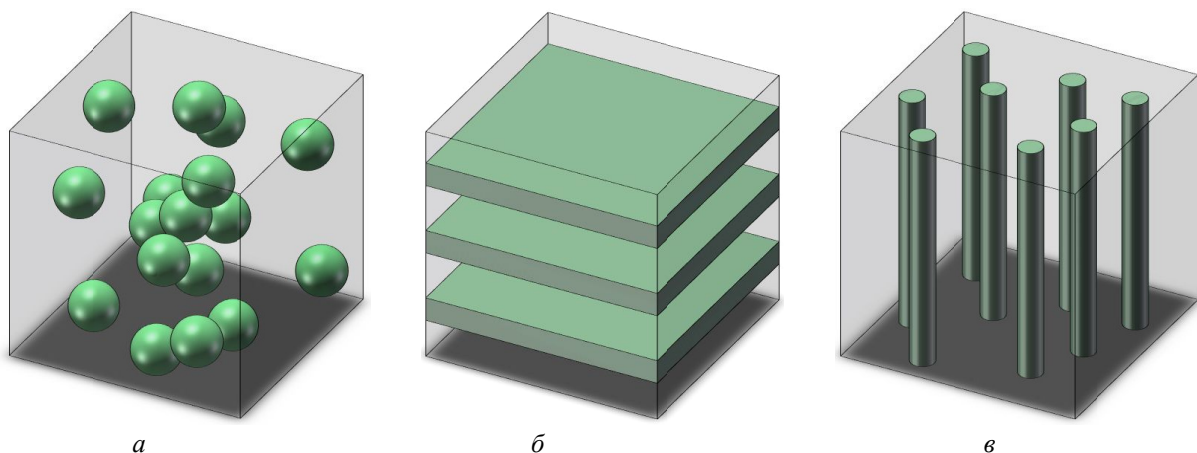


Рис. 1. Три объемных композита с тремя самыми распространенными схемами связи: объемный композит 0–3 (а); слоистый композит со связностью 2–2 (б); волокнистые/стержневые композиты со связностью 1–3 (в).

Верхний индекс T обозначает транспонированную матрицу тензоров. Тензоры s , e , q , ε , μ и α являются соответственно матрицами размерами (6×6) , (3×6) , (3×6) , (3×3) , (3×3) и (3×3) в деформационном представлении. Для пьезоэлектрической фазы (например, ВаТiО₃ и ЦТС) в композите $q = 0$ и $\alpha = 0$; для магнитной фазы (например, Со- и Ni-феррит) в композите $e = 0$ и $\alpha = 0$. Но уже в их композиции результирующий МЭ коэффициент, зависящий от составляющих композит микроструктур (т.е. свойств фаз компонентов, объемных долей, форм зерен, связи между фазами и т.д.), $\alpha \neq 0$.

Кубическая модель объемных композитов [12,13] предполагает разбиение композита, например, со связностью типа 0–3 на малые кубики, затем расчет поля в одном кубе, для которого проблема граничных усло-

вий легко решаема. Такая простая модель не может быть обобщающей для других топологий и подходит только для понимания на определенном уровне физических процессов.

Для решения основных уравнений (1)–(3) может быть использован метод эффективной среды, при этом эффективные параметры композита определяются через усредненные поля. На основе такого подхода могут быть найдены все эффективные свойства композита. Например, для эффективной МЭ восприимчивости композита со связностью типа 2–2 при продольной ориентации магнитных и электрических полей (подмагничивающее и переменные магнитное и электрическое поля, а также направление поляризации перпендикулярны плоскости образца) получено следующее выражение:

$$\alpha_{33} = 2 \frac{\mu_0 (v-1)^p d_{31}^m q_{31}}{[\mu_0 (v-1) - {}^m \mu_{33} v][v({}^m s_{12} + {}^m s_{11}) - ({}^p s_{11} + {}^p s_{12})(v-1)] + 2 {}^m q_{31}^2 v^2}. \quad (4)$$

В формуле (4) верхние индексы p и m относятся к пьезоэлектрической и пьезомагнитной фазам соответственно, v — объемная доля ЦТС.

Для случая поперечной ориентации полей (постоянное и переменное магнитные поля лежат в плоскости образца, а переменное электрическое поле и направление поляризации перпендикулярны плоскости образца) МЭ восприимчивость имеет вид [14]

$$\alpha_{31} = \frac{(v-1)({}^m q_{11} + {}^m q_{21})^p d_{31}}{(v-1)({}^p s_{11} + {}^p s_{12}) - v({}^m s_{11} + {}^m s_{12})}. \quad (5)$$

В случае продольной ориентации полей (постоянное и переменное магнитные поля, а также переменное электрическое поле и направление поляризации лежат в плоскости образца) для МЭ восприимчивости получено выражение

$$\alpha_{11} = \frac{\{[{}^m q_{11}({}^p s_{33} {}^p d_{11} - {}^p s_{12} {}^p d_{12}) + {}^m q_{12}({}^p s_{11} {}^p d_{12} - {}^p s_{12} {}^p d_{11})](1-v) + [{}^m q_{11}({}^m s_{11} {}^p d_{11} - {}^m s_{12} {}^p d_{12}) + {}^m q_{12}({}^m s_{11} {}^p d_{12} - {}^m s_{12} {}^p d_{11})]vk\}v(1-v)}{({}^p s_{33} {}^p s_{11} - {}^p s_{12}^2)(1-v)^2 + v^2({}^m s_{11}^2 - {}^m s_{12}^2) + ({}^p s_{33} {}^m s_{11} + {}^m s_{11} {}^p s_{11} - 2 {}^m s_{12} {}^p s_{13})v(1-v)}. \quad (6)$$

На рис. 2 приведены поперечный и продольный в плоскости образца МЭ коэффициенты по напряжению α_E композита состава феррит кобальта–ЦТС в зависимости от объемной доли ЦТС.

МЭ коэффициент α_E , приведенный на рис. 2, описывает индуцируемое напряжение во внешнем магнитном поле в условиях разомкнутой электрической цепи:

$$\alpha_{Eij} = \alpha_{ij} / \varepsilon_{ii}. \quad (7)$$

Указанный МЭ коэффициент позволяет дать оценку возможности использования МЭ материалов в устройствах функциональной электроники.

Как следует из рис. 2, при изменении ориентации магнитных и электрических полей с поперечной на продольную в плоскости образца происходит резкое

увеличение МЭ коэффициента. На графике концентрационной зависимости α_{E11} наблюдается быстрое увеличение МЭ коэффициента до максимума при $v = 0,11$ и последующее почти линейное уменьшение с ростом v . Наблюдаемое резкое увеличение обусловлено 1) отсутствием размагничивающих полей и 2) большим значением пьезоэлектрического и пьезомагнитного модулей по сравнению с продольной ориентацией полей. Уменьшение объемной доли пьезоэлектрической компоненты, соответствующей максимуму МЭ коэффициента, от 0,5–0,6 для продольной и поперечной ориентаций полей до значительно меньшей величины 0,1 связано с концентрационной зависимостью эффективной диэлектрической проницаемости.

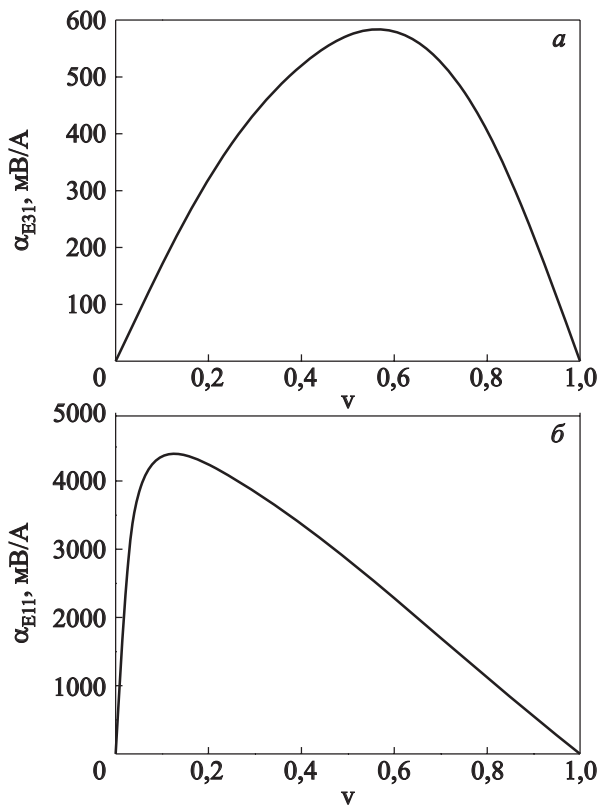


Рис. 2. Концентрационная зависимость поперечного (а) и продольного в плоскости образца (б) МЭ коэффициентов α_E композита феррит кобальта–ЦТС [14].

Приведенные оценки сделаны в предположении идеальной механической связи между магнитной и пьезоэлектрической фазами. Для такого слоистого композита разработан [14] обобщенный метод расчета МЭ эффекта путем введения коэффициента k для описания реальных условий связи на границе раздела, т.е. $k = ({}^P S_i - {}^P S_{i0}) / ({}^m S_i - {}^P S_{i0})$ ($i = 1, 2$), где ${}^P S_{i0}$ — тензор деформации компонентов без учета трения между ними. Он зависит от качества связи и разницы деформаций между пьезоэлектрическим и магнитным слоями: $k = 1$ соответствует идеальному соединению и $k = 0$ — соединению без трения. В таком материале МЭ коэффициент слоистого композита может быть найден как

$$\alpha_{E33} = \frac{E_3}{H_3} = \frac{2k\nu(1-\nu)d_{31}q_{31}\mu_0\underline{s}}{[2(1-\nu)d_{31}^2 - {}^P \varepsilon_{33}\underline{s}](\bar{\mu}\underline{s} + 2kq_{31}^2\nu^2)} \quad (8)$$

$$\alpha_{E31} = \frac{E_3}{H_1} = \frac{-k\nu(1-\nu)(q_{11} + q_{21})d_{31}}{{}^P \varepsilon_{33}\underline{s} - 2(1-\nu)d_{31}^2}, \quad (9)$$

где $\underline{s} = (1-\nu)({}^P s_{11} + {}^P s_{12}) + k\nu({}^m s_{11} + {}^m s_{12})$.

Очевидно, при $k = 1$ эти два выражения сводятся к (4) и (5); при $k = 0$ МЭ эффект исчезает из-за отсутствия механической связи между фазами. Фактически МЭ коэффициент лежит между двумя значениями $k = 0$ и $k = 1$. На рис. 3 показан пример вычислений предель-

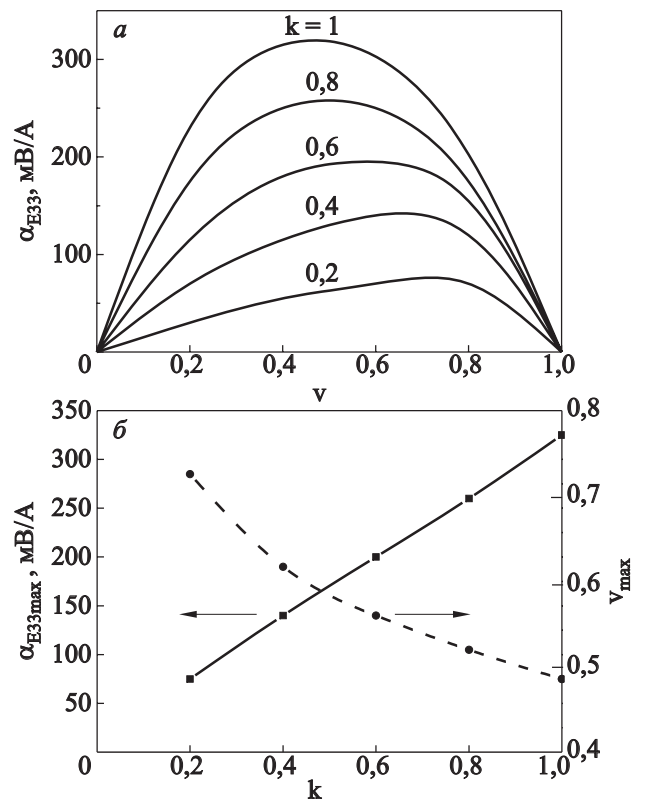


Рис. 3. Концентрационная зависимость продольного МЭ коэффициента α_E для свободного образца композита феррит кобальта–ЦТС (а); зависимость максимального значения МЭ коэффициента и соответствующей ему объемной доли пьезоэлектрической фазы ν_{\max} от параметра межслоевой связи [14] (б).

ных значений для слоистого композита PZT и CoFe_2O_4 типа 2–2 при различных значениях k . Выражения (8) и (9) хорошо подходят для выбора значения k в экспериментах и облегчают описание качества связи фаз путем вычисления k из измеренного МЭ коэффициента.

3. Резонансное усиление магнитоэлектрического эффекта

В работах [15–21] разработана теория МЭ эффекта в композитах в области электромеханического, ферромагнитного и магнитоакустического резонансов. Поскольку МЭ эффект в композитах обусловлен механическим взаимодействием между пьезоэлектрической и магнитной фазами, МЭ эффект во много раз возрастает, когда пьезоэлектрическая или магнитная фаза находится в условиях резонанса, т.е. электромеханического резонанса (ЭМР) для пьезоэлектрической фазы и ферромагнитного резонанса (ФМР) для магнитной. Механические колебания возбуждаются переменными магнитным и электрическим полями с длиной волны, намного большей размера композита и составляющей десятки метров. Появляется возможность пренебречь пространственным изменением электрического и маг-

нитного поля внутри объема образца. Для описания частотной зависимости МЭ эффекта необходимо к формуле (3) добавить уравнение эластодинамики, которое имеет вид

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j}, \quad (10)$$

где u_i — i -я компонента вектора смещений; T_{ij} по-прежнему обозначает тензор напряжений, который связывает натяжение, электрическое и магнитное поля согласно формуле (3).

Объединение выражений (1)–(3) и (10) с учетом граничных условий дает частотную зависимость МЭ коэффициента.

Результаты вычислений по формуле (10) зависят от формы образца и ориентации электрического и магнитного поля. Решения для композитов различной формы могут быть легко получены. Например, рассмотрим прямоугольную двухслойную структуру толщиной t , шириной w и длиной $L \gg t$ и w . Поляризация по-прежнему направлена вдоль x_3 . Учитывая граничные условия и выражая компоненты напряжения через деформации, запишем u_x в виде [19]

$$u_x(x) = \frac{1}{k} \left(\frac{\cos kL - 1}{\sin kL} \cos kx + \sin kx \right) (d_{31}E_3 + q_{31}H_3), \quad (11)$$

где $k = \omega(\rho s_{11})^{1/2}$; ω — угловая частота; ρ , s_{11} , d_{31} и q_{31} — соответственно эффективная плотность, податливость, пьезоэлектрический и пьезомагнитный коэффициенты композита. Замена q_{31} на q_{11} дает выражение для структуры с продольной ориентацией поля. Далее, используя условие разомкнутой цепи, т.е.

$$\int_w dy \int_i D_3 dx = 0,$$

можно получить выражения для наводимого напряжения E_3 в композите. Используя определение МЭ коэффициента как $E_3 = \alpha_{E,L}H_3 (= \alpha_{E33}H_3)$ при продольной и $E_3 = \alpha_{E,T}H_1 (= \alpha_{E31}H_1)$ при поперечной ориентациях, выразим динамический МЭ коэффициент как [19]

$$\alpha_{E,L} = \frac{d_{31}q_{31}N - \alpha_{33}s_{11}}{\epsilon_{33}s_{11} - d_{31}^2N}, \quad (12)$$

$$\alpha_{E,T} = \frac{d_{31}q_{11}N - \alpha_{31}s_{11}}{\epsilon_{33}s_{11} - d_{31}^2N}, \quad (13)$$

где $N = 1 - (2/kL) \operatorname{tg}(kL/2)$.

Величины, входящие в приведенные формулы, представляют собой эффективные параметры композита. Как видно из выражения (12), при так называемой частоте антирезонанса, когда $\epsilon_{33}s_{11} - Nd_{31}^2 = 0$, МЭ коэффициент резко возрастает. Эта частота антирезонанса зависит от эффективных параметров композита и

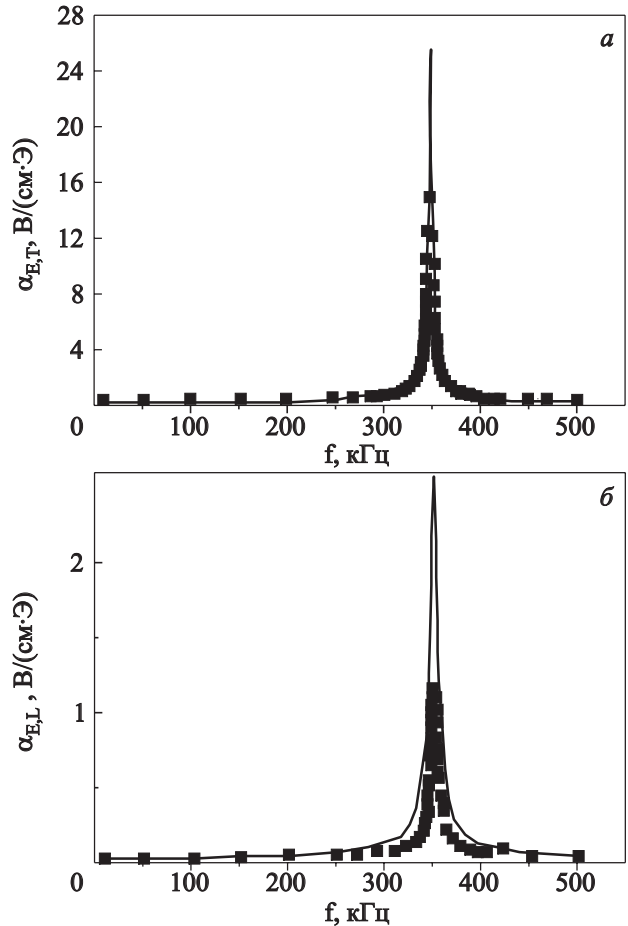


Рис. 4. Частотная зависимость поперечного (а) и продольного (б) МЭ коэффициента α_E в области ЭМР для двухслойной структуры CoFe_2O_4 –ЦТС [19].

его геометрических размеров. Например, для двухслойной ферритовой шпинели и ЦТС с L около сантиметра такая резонансная частота лежит в районе 300 кГц.

Пример зависимости для слоистого композита ЦТС– CoFe_2O_4 (прямоугольной пластины длиной 7,3 мм и шириной 2,15 мм) показан на рис. 4.

На частоте порядка 300 кГц наблюдается резонансное увеличение МЭ эффекта. Максимальное значение МЭ коэффициента — при поперечной ориентации полей — более чем в 10 раз выше, чем при продольной ориентации.

Второй резонансный феномен — ферромагнитный резонанс (ФМР). При ФМР спин-решеточное взаимодействие и спиновые волны, которые связывают энергию фононов через процессы релаксации, также усиливают МЭ взаимодействие. Электрическое поле создает механическую деформацию в пьезоэлектрической фазе, что приводит к смещению резонансного поля для магнитной фазы. На рис. 5 показана расчетная резонансная кривая в отсутствие и при наличии электрического поля для двухслойной структуры феррит никеля (NFO)–ЦТС, феррит лития (LFO)–ЦТС и железоиттриевый гранат (ЖИГ)–ЦТС. Вычисления показывают

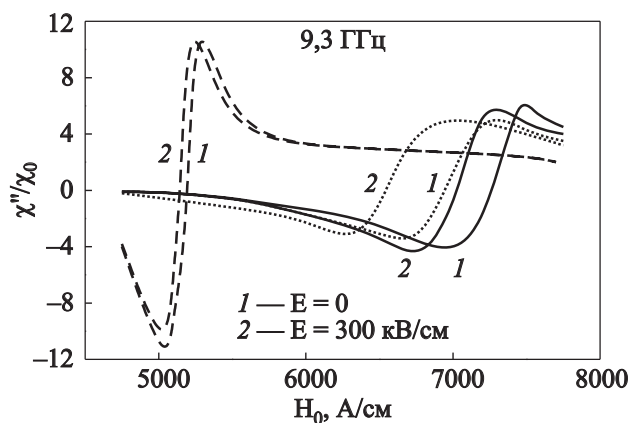


Рис. 5. Теоретические зависимости магнитной восприимчивости от статического поля H для двухслойных структур LFO–ЦТС (—), NFO–ЦТС (⋯) и ЖИГ–ЦТС (---) на частоте 9,3 ГГц. \mathbf{H} и \mathbf{E} направлены перпендикулярно плоскости образца при электрическом поле $E = 0$ (1) и $E = 300$ кВ/см (2) [17].

большое смещение резонансного поля для NiFe_2O_4 (NFO)–ЦТС и малый сдвиг для ЖИГ–ЦТС [17].

Третий резонансный феномен заключается в значительном возрастании МЭ взаимодействия при совпадении частот ФМР и ЭМР, т.е. при магнитоакустическом резонансе (МАР) [15]. На рис. 6 показаны теоретические оценки изменения МЭ коэффициента α_E при приложении к двухслойной структуре NFO–ЦТС переменного магнитного поля. Толщины слоев NFO и ЦТС — 100 и 200 нм соответственно.

На рис. 6,а смещение поля H_0 мало по сравнению с полем H_r для ФМР в NFO. Пик α_E приходится на основную и вторую гармоники ЭМР толщинной моды двухслойной структуры. На рис. 6,б H_0 выбрано так, чтобы ФМР в NFO совпадал с основной модой ЭМР, что приводит к увеличению α_E при МАР. На рис. 6,в вторая гармоника акустической моды в NFO–ЦТС совпадает с ФМР. Таким образом, наблюдается динамическое увеличение α_E при МАР.

По результатам моделирования можно сделать следующие важные выводы: 1) совпадение ФМР и ЭМР допускает обмен энергией между фононами, спиновыми волнами, электрическими и магнитными полями, и такой перенос энергии может быть очень эффективно использован, например, в двухслойных структурах феррит–ЦТС; 2) гигантский МЭ коэффициент может быть достигнут при МАР. Этот эффект важен для миниатюризации датчиков, сенсоров для диапазона СВЧ.

Заключение

Хотя большая часть МЭ керамических композитов обладают большим линейным МЭ эффектом, наблюдаемый эффект в спеченных керамических композитах по-прежнему остается ниже расчетного более чем в 10

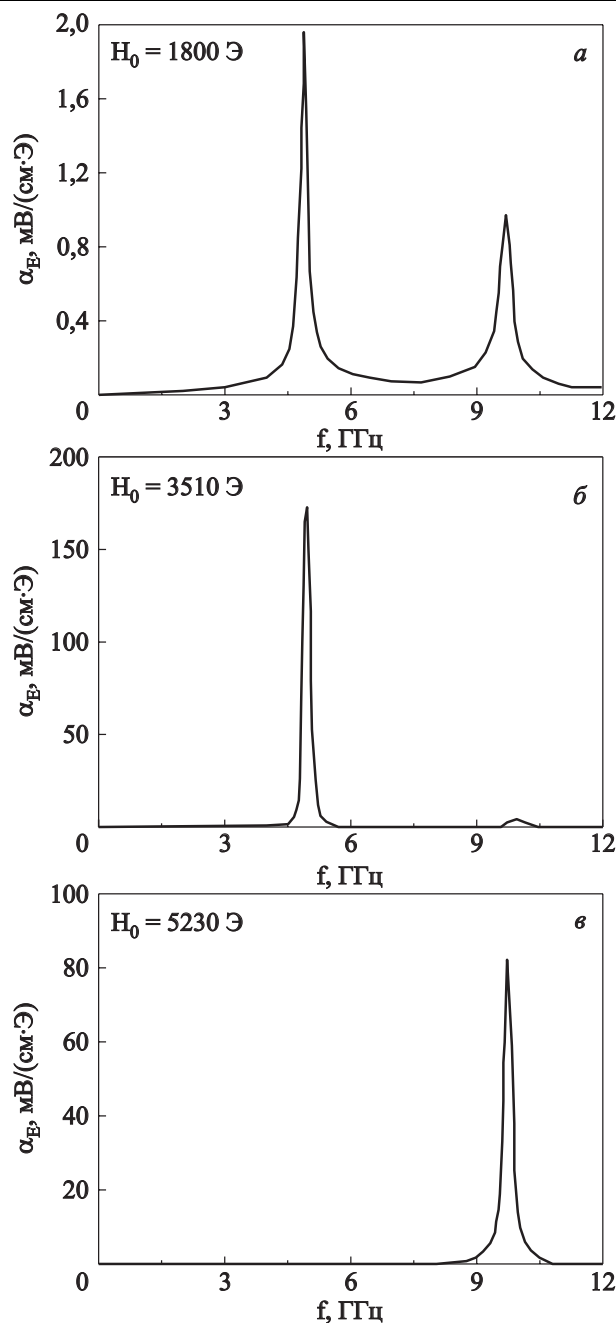


Рис. 6. Теоретическая частотная зависимость МЭ коэффициента α_E при приложении к двухслойной структуре NFO–ЦТС переменного магнитного поля: а — пик α_E приходится на первую и вторую резонансные частоты ЭМР толщинной моды двухслойной структуры; б — МЭ взаимодействие при совпадении ЭМР и ФМР; в — результаты, аналогичные (б), для второй гармоники МАР [15].

раз из-за проблем их производства (атомная межфазная диффузия, проблемы взаимодействия двух керамических фаз в процессе термической обработки).

В дисперсных керамических композитах необходимо получить хорошую дисперсию фазы феррита при высокой концентрации в пьезоэлектрической матрице, приемлемые межфазные границы, достаточные объем-

ные доли, избегая при этом межфазного взаимодействия и межслоевой диффузии.

Для слоистой керамики управление спеканием слоев феррита и пьезоэлектрика с качественным межфазным контактом, но без межслоевой диффузии и взаимодействия, является таким же ключевым вопросом, как и при спекании многослойных керамических приборов.

МЭ керамические композиты пригодны для практического применения в устройствах вследствие большого МЭ эффекта при комнатной температуре. Некоторые варианты СВЧ устройств, основанных на МЭ композитах, уже предложены [9].

Среди МЭ композитов структуры, основанные на магнитострикционных сплавах (например, терфенол), обладают самым сильным МЭ эффектом в широком частотном диапазоне. Самый большой дорезонансный МЭ коэффициент по напряжению (5,5 В/(см·Э)) наблюдался для С–С моды в трехслойном кольцевом слоистом композите терфенол–ЦТС–терфенол. Для таких магнитных сплавов требуется дальнейшая оптимизация конфигурации многослойных структур, включение дополнительных фаз с более высокими μ , конструирование управляемой связи фаз феррита и пьезоэлектрика. Существует множество других, еще не проверенных возможностей.

Недавно в качестве магнитострикционных слоев были использованы слои метгласа [22]. Метглас обладает чрезвычайно высокой магнитной проницаемостью ($\mu_r \sim 30000$), но низкой магнитострикцией. Из-за его сверхвысокой μ_r эффективный пьезомагнитный коэффициент увеличивается при небольшом постоянном подмагничивающем поле, что делает этот материал идеальным кандидатом на включение в МЭ композит.

Согласно предварительным оценкам, максимальное значение dE/dH при L–L моде составляет 22 В/(см·Э) при поле H_{dc} всего 5 Э. Это значение почти на порядок выше, чем для L–L моды МЭ слоистого композита, основанного на терфеноле. Кроме того, на резонансной частоте это значение может быть увеличено до 500 В/(см·Э). Разработка волокнистой структуры Metglas–ЦТС типа 2–1 является на данный момент важным направлением в МЭ слоистых композитах.

Получены небольшие стержневые МЭ композиты с одним керамическим стержнем ЦТС, залитым в матрицу терфенол/эпоксидная смола (TDE). Экспериментальные данные показывают, что взаимодействие между стержнем ЦТС и матрицей TDE обладает намного большим МЭ откликом, чем в трехфазных композиционных структурах на основе полимера. В диапазоне высоких частот при электромеханическом резонансе такие стержневые структуры обладают гигантским МЭ эффектом. Их МЭ отклик зависит от размеров образца, поэтому возможно получение небольших МЭ стержней (микро-МЭ стержни) с большим МЭ откликом, ис-

пользуя единственное волокно ЦТС. Такие материалы — будущая основа для микроэлектронных МЭ устройств.

В композитах, основанных на магнитном сплаве (двухфазных или трехфазных), пьезоэлектрическая керамика и магнитный сплав соединены вместе при помощи полимера. Срок службы таких МЭ композитов зависит от полимерного соединения фаз. Важно установить, каким образом полимерное соединение фаз воздействует на МЭ отклик и усталостные характеристики композита.

Интерес к наноструктурам в последнее время постоянно возрастает, так как они, особенно тонкие МЭ пленки, обладают возможностью интеграции на одном кристалле, что является предпосылками их применения в микроэлектронных устройствах. Но МЭ наноструктуры еще находятся в стадии разработки. Потенциал МЭ наноструктур и устройств на их основе практически безграничный, но сначала необходимо решить ряд фундаментальных задач. Первая задача, относящаяся к области физики, — выращивание необходимых МЭ наноструктур с контролируемым составом, атомным расположением и заданной поверхностью раздела. Был проведен поиск в области наноматериалов и наноструктур относительно применения таких технологий в новейших областях управляемых процессов. Например, формирование самосогласованных, вертикальных наноструктур с дальним порядком, несомненно, ускорит развитие исследований не только в области магнитоэлектрических мультиферроиков, но и в области фотоники. Высококачественные горизонтальные гетероструктуры, такие как МЭ сверхрешетки [23], открывают возможности получения новых мультиферроиков и устройств на их основе.

Остается много нерешенных вопросов относительно МЭ связи в наноструктурах, касающихся временной зависимости процесса взаимодействия, наименьшей величины магнитного поля, приводящего к полному переключению намагниченности, зависимости происходящих процессов от химического состава, критических размеров образцов, при которых исчезает МЭ связь или изменяется ее природа.

1. H. Schmid, *Ferroelectrics* **162**, 317 (1994).
2. M. Fiebig, *J. Phys.* **D38**, R123 (2005).
3. W. Eerenstein, N.D. Mathur, and J.F. Scott, *Nature* **442**, 759 (2006).
4. H. Schmid et al. (eds.), *Proc. MEIPIC-2*, Ascona, Switzerland, 13–18 September (1993), *Ferroelectrics* **161** (1994).
5. M. Bichurin (ed.), *Proc. MEIPIC-3*, Novgorod, Russia, 16–20 September (1996), *Ferroelectrics* **204** (1997).
6. M. Bichurin (ed.), *Proc. MEIPIC-4*, Novgorod, Russia, 16–19 October (2001), *Ferroelectrics* **279–280** (2002).
7. M. Fiebig, V.V. Eremenko, and I.E. Chupis (eds.), *Proc. MEIPIC-5*, Sudak, Ukraine, 21–24 September (2003).

8. Г.А. Смоленский, И.Е. Чупис, *УФН* **137**, 415 (1982).
9. C.-W. Nan, M.I. Bichurin, S. Dong, D. Viehland, and G. Srinivasan, *J. Appl. Phys.* **103**, 031101 (2008).
10. *Magnetolectric Interaction Phenomena in Crystals*, A.J. Freeman and H. Schmid (eds.), London, New York, Paris: Gordon and Breach (1975).
11. R.E. Newnham, D.P. Skinner, and L.E. Cross, *Mater. Res. Bull.* **13**, 525 (1978).
12. G. Harshe, J.P. Dougherty, and R.E. Newnham, *Int. J. Appl. Electromagn. Mater.* **4**, 145 (1993).
13. V.M. Petrov, M.I. Bichurin, V.M. Laletin, N. Paddubnaya, and G. Srinivasan, *Magnetolectric Interaction Phenomena in Crystals – NATO Science Series II*. vol. **164**, M. Fiebig, V.V. Eremenko, and I.E. Chupis (eds.), Kluwer Academic Publishers, London (2004), p. 65.
14. M.I. Bichurin, V.M. Petrov, and G. Srinivasan, *J. Appl. Phys.* **92**, 7681 (2002); M.I. Bichurin, V.M. Petrov, and G. Srinivasan, *Phys. Rev.* **B68**, 054402 (2003).
15. M.I. Bichurin, V.M. Petrov, O.V. Ryabkov, S.V. Averkin, and G. Srinivasan, *Phys. Rev.* **B72**, 060408 (2005).
16. M.I. Bichurin and V.M. Petrov, *Sov. Phys. Tech. Phys.* **33**, 1389 (1989).
17. M.I. Bichurin, V.M. Petrov, and Y.V. Kiliba, *Phys. Rev.* **B66**, 134404 (2002).
18. M.I. Bichurin, V.M. Petrov, and I.A. Kornev, *Ferroelectrics* **280**, 353 (2002).
19. M.I. Bichurin, D.A. Filippov, and V.M. Petrov, *Phys. Rev.* **B68**, 132408 (2003).
20. D.A. Filippov, M.I. Bichurin, and V.M. Petrov, *Tech. Phys. Lett.* **30**, 6 (2004).
21. M.I. Bichurin and V.M. Petrov, *Ferroelectrics* **162**, 33 (1994).
22. S.X. Dong, J.Y. Zhai, J.F. Li, and D. Viehland, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 252904 (2006).
23. M.P. Singh and W. Prellier, *Philos. Mag. Lett.* **87**, 211 (2007).

Magnetolectric effect in magnetostriction-piezoelectric multiferroics

M.I. Bichurin and V.M. Petrov

Present studies of magnetolectric (ME) composite multiferroics are analyzed. In such materials the ME effect arises from magnetostriction and piezoelectric properties of components. The elastic mechanical interaction between magnetostriction and piezoelectric phases results in a giant magnetolectric response in magnetolectric composite materials. In the vicinity of electromechanical resonance the ME effect is enhanced more than by a factor of 100. Interest in possible construction of integrated devices has been provoked by recent nanostructural composites of ferroelectric and magnetic oxides prepared in the film-on-substrate form. The ME interaction between ferroelectric and magnetic oxides of nanometers size is the same as that in common composite materials. Like bulk ME composites, the ME effect in nanocomposites may be applied in converters sensors, transducers, and in a variety of reproducing-recording devices.

PACS: **75.80.+q** Magnetomechanical and magnetolectric effects, magnetostriction;
78.67.Pt Multilayers; superlattices; photonic structures; metamaterials;
76.50.+g Ferromagnetic, antiferromagnetic, and ferrimagnetic resonances; spin-wave resonance.

Keywords: magnetolectric effect, magnetostriction-piezoelectric multiferroics, electromechanical resonance, magnetic resonance.