

01;05

## **Инверсный магнитоэлектрический эффект в феррит-пьезоэлектрических структурах**

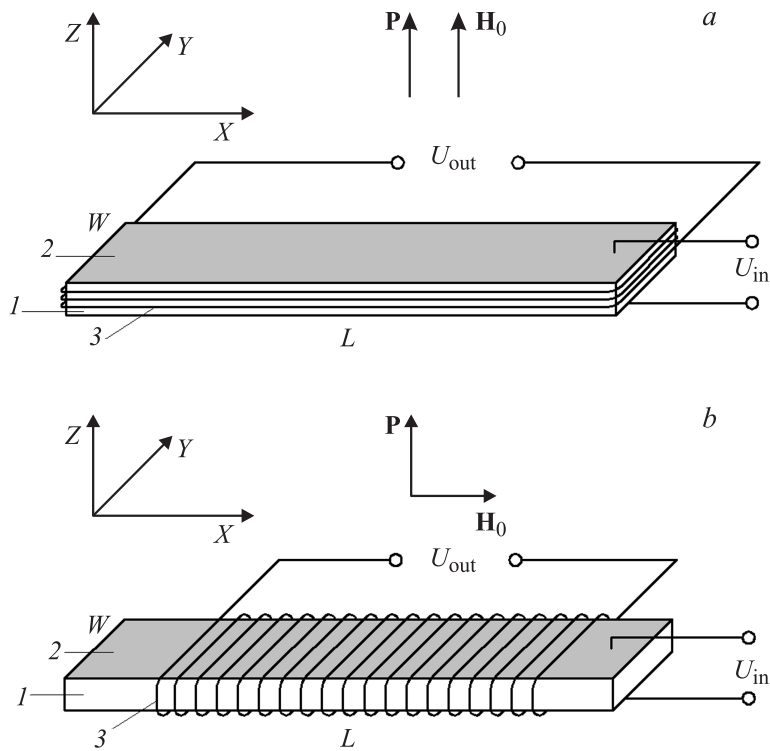
© Д.А. Филиппов, Т.А. Галкина, G. Srinivasan

Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого,  
Великий Новгород, Россия  
Physics Department, Oakland University, Rochester, MI 48309, USA  
E-mail: Dmitry.Filippov@novsu.ru

Поступило в Редакцию 15 июня 2010 г.

Представлена теория инверсного магнитоэлектрического (МЭ) эффекта в объемных композиционных материалах. Используя материальные уравнения и уравнения движения, получено выражение для частотной зависимости коэффициента инверсного МЭ-преобразования и коэффициента преобразования напряжения МЭ-трансформатора. Показано, что зависимости имеют резонансный характер и на частоте резонанса имеет место пиковое увеличение МЭ-эффекта. Коэффициент трансформации напряжения зависит не только от коэффициента МЭ-преобразования и числа витков катушки индуктивности, но и от взаимной ориентации электрического и магнитного полей и геометрических размеров образца.

Магнитоэлектрический (МЭ) эффект, впервые предсказанный в [1] и экспериментально обнаруженный в [2,3], заключается в возникновении поляризации под действием магнитного поля (прямой МЭ-эффект), и наоборот, в возникновении намагниченности под действием электрического поля (инверсный или обратный МЭ-эффект). В настоящее время прямой МЭ-эффект изучен достаточно подробно [4], однако инверсный МЭ-эффект изучен еще недостаточно. Имеется всего несколько публикаций [5–7], посвященных инверсному МЭ-эффекту. В то же время он представляет интерес не только с теоретической, но и с практической точки зрения, поскольку позволяет управлять магнитными характеристиками вещества электрическим полем. В частности, на основе инверсного МЭ-эффекта можно создать трансформатор, состоящий из магнитоэлектрического конденсатора и катушки индуктивности.



Схематичное изображение структуры: *a* — продольная ориентация, *b* — поперечная ориентация полей. 1 — образец, 2 — металлизированные электроды, 3 — измерительная катушка.

В феррит-пьезоэлектрических композитах МЭ-эффект возникает в результате механического взаимодействия ферритовой и пьезоэлектрической подсистем. При инверсном эффекте в пьезоэлектрике под действием электрического поля возникают деформации, которые передаются в ферритовую фазу, где, вследствие магнитострикции, возникает намагниченность.

С макроскопической точки зрения феррит-пьезоэлектрические композиты можно характеризовать некоторыми эффективными параметрами. Эффективные параметры можно использовать тогда, когда характерные масштабы изменения внешних воздействий много больше

размеров структурных единиц [8]. Для объемных композитов материалов типичный размер зерна порядка  $10 \mu\text{m}$ , поэтому эти эффективные параметры можно использовать для описания распространения упругих взаимодействий вплоть до частот порядка сотен мегагерц.

В качестве модели рассмотрим структуру, представляющую собой плоский конденсатор с намотанной на него катушкой индуктивности. В качестве диэлектрика используется прямоугольный образец в виде пластинки из феррит-пьезоэлектрического композита, предварительно поляризованного по нормали к плоскости контактов (см. рисунок). Будем считать, что длина образца  $L$  много больше его ширины  $W$  и толщины  $d$ . Постоянное и переменное магнитное поле с частотой  $\omega$  может быть направлено или вдоль той же оси (продольная ориентация полей, рисунок, *a*), или перпендикулярно к направлению поляризации, вдоль оси  $X$  (поперечная ориентация полей, рисунок, *b*). В соответствии с этим будем различать продольный и поперечный МЭ-эффекты.

Будем считать, что поверхности пластинки свободные. В этом случае нормальные составляющие тензора напряжений на них равны нулю, т. е.  $T_1 = T_2 = T_3 = 0$  на поверхностях пластинки. Так как пластинка тонкая и узкая, то можно считать, что  $T_2 = T_3 = 0$  не только на поверхности, но и во всем объеме пластинки, и отличной от нуля компонентой тензора напряжений в объеме пластинки будет только  $T_1$ . В соответствии с этим при продольной ориентации полей уравнения для интересующих нас компонент тензора деформаций  $S_i$  и индукции магнитного поля  $B_i$  примут вид

$$S_1 = s_{11}T_1 + d_{31}E_3 + q_{31}H_3, \quad (1)$$

$$B_3 = \mu_{33}H_3 + q_{31}T_1, \quad (2)$$

где  $s_{11}$  — компоненты тензора податливости,  $T_1$  — компонента тензора напряжений,  $\mu_{33}$  — компонента тензора магнитной проницаемости,  $d_{31}, q_{31}$  — пьезоэлектрический и пьезомагнитный коэффициенты,  $E_3(t) = E_m e^{-i\omega t}$  — переменное электрическое поле, подаваемое на обкладки образца.

Аналогично тому, как при прямом МЭ-эффекте для его характеристики используется МЭ-коэффициент по напряжению, равный  $\alpha_E = \frac{E}{H}$ , для характеристики инверсного МЭ-эффекта используют коэффициент инверсного МЭ-преобразования, который равен  $\alpha_B = \frac{B}{E}$ , где  $E, H$  — напряженности электрического и магнитного полей,  $B$  — индукция магнитного поля. Для его вычисления выразим из (1) компоненты тензора

напряжений через компоненты тензора деформаций, в результате чего получим

$$T_1 = \frac{1}{s_{11}} S_1 - \frac{1}{s_{11}} (d_{31}E_3 + q_{31}H_3). \quad (3)$$

Подставляя выражение (3) в уравнение движения среды, получим дифференциальное уравнение для  $x$ -проекции вектора смещения среды  $u_x$ , решение которого имеет вид [9]

$$u_x(x) = \frac{1}{k} \left( \left( \frac{\cos(kL) - 1}{\sin(kL)} \right) \cos(kx) + \sin(kx) \right) (d_{31}E_3 + q_{31}H_3), \quad (4)$$

где параметр  $k = \omega \sqrt{\rho s_{11}}$ .

Выражение для индукции магнитного поля получим из уравнения (2). Подставляя выражение для тензора напряжений (3) в уравнение (2), получим

$$B_3 = \mu_{33}H_3 + q_{31} \left( \frac{1}{s_{11}} \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) - \frac{1}{s_{11}} q_{31} (d_{31}E_3 + q_{31}H_3). \quad (5)$$

При экспериментальном исследовании инверсного МЭ-эффекта измеряют ЭДС, индуцируемую в катушке переменным магнитным полем. При измерениях сопротивление вольтметра много больше сопротивления катушки, поэтому можно считать, что выполняется условие разомкнутой цепи, т.е.  $I = 0$ , следовательно, и  $H_3 = 0$ . С учетом этого для индукции магнитного поля получим выражение

$$B_3 = \frac{q_{31}}{s_{11}} \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{q_{31}d_{31}}{s_{11}} E_3. \quad (6)$$

Коэффициент инверсного МЭ-преобразования при продольной ориентации полей определим как  $\alpha_{B,L} = \langle B_3 \rangle / E_3$ , где  $\langle B_3 \rangle$  — среднее значение индукции магнитного поля в образце  $\langle B_3 \rangle = \frac{1}{L} \int_0^L B_3 dx$ .

Вычисляя среднее значение индукции магнитного поля и подставляя получившееся выражение в определение коэффициента инверсного МЭ-преобразования, получим

$$\alpha_{B,L} = \frac{q_{31}d_{31}}{s_{11}} \left( \frac{\text{tg}(\kappa)}{\kappa} - 1 \right), \quad (7)$$

где параметр  $\kappa = kL/2$ .

При поперечной ориентации полей в выражении для коэффициента инверсного МЭ-преобразования вместо  $q_{31}$  будет входить  $q_{11}$ .

Как следует из (7) в случае, когда параметр  $\kappa = (n + 1/2)\pi$ , наблюдается резонансное увеличение коэффициента инверсного МЭ-преобразования. Отсюда следует, что резонансные частоты определяются выражением  $f_{res} = (n + 1/2)/(L\sqrt{\rho s_{11}})$ . Следует отметить, что в отличие от инверсного МЭ-эффекта при прямом МЭ-эффекте резонансное увеличение наблюдается на частоте антирезонанса [9], когда параметр  $\Delta_a = 1 - K_{31}^2 (\text{tg}(\kappa)/\kappa - 1) = 0$ . Здесь  $K_{31}^2 = d_{31}^2/(\varepsilon_{33}s_{11})$  — квадрат коэффициента электромеханической связи при планарных колебаниях.

ЭДС индукции, возникающая в измерительной катушке, равна  $\varepsilon = -\partial\Phi/\partial t$ . Магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий измерительную катушку, при продольной ориентации полей определяется как  $\Phi_L = N \int_0^W dy \int_0^L B_3(x) dx = NWL\alpha_{BL}E$ , где  $E = U_{in}/t$ ,  $U_m$  — входное напряжение,  $t$  — толщина образца,  $N$  — число витков катушки. С учетом этого напряжение на выходе  $U_{out}$  равно

$$U_{out} = N \frac{WL}{t} \omega \alpha_{BL} U_{in}. \quad (8)$$

Отсюда при продольном эффекте коэффициент трансформации по напряжению

$$k_L = U_{out}/U_{in} = \omega N \frac{WL}{t} \frac{d_{31}q_{31}}{s_{11}} \left( \frac{\text{tg}(\kappa)}{\kappa} - 1 \right). \quad (9)$$

При поперечном эффекте магнитный поток, пронизывающий катушку, равен  $\Phi_T = NWT\langle B_1 \rangle = NWT\alpha_{BT}E = NWT\alpha_{BT}U_{in}$ , и для коэффициента трансформации имеем

$$k_T = \omega NW \frac{d_{31}q_{11}}{s_{11}} \left( \frac{\text{tg}(\kappa)}{\kappa} - 1 \right). \quad (10)$$

Отношение коэффициентов трансформации равно  $k_L/k_T = (L/t)(q_{31}/q_{11})$ . С одной стороны,  $q_{31}/q_{11} < 1$ , однако в отношении коэффициентов это отношение умножается на отношение  $L/t > 1$ . Поэтому коэффициент трансформации зависит не только от параметров МЭ-композита, но также и от геометрических рамеров структуры, и от взаимной ориентации электрического и магнитного полей.

## Список литературы

- [1] Дзялошинский И.Б. // ЖЭТФ. 1959. Т. 37. С. 881–882.
- [2] Астров Д.Н. // ЖЭТФ. 1961. Т. 40. С. 1035–1041.
- [3] Folen V.J., Rado G.T., Stalder E.W. // Phys. Rev. Lett. 1961. V. 6. N 11. P. 607–608; V. 46. N 3. P. 1033–1034.
- [4] Fiebig M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. 123.
- [5] Dong S., Li J.F., Viehland D., Cheng J., Cross L.E. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. N 16. P. 3534–3536.
- [6] Fetisov Y.K., Petrov V.M., Srinivasan G. // J. Mater. Res. V. 22. N 8. P. 2074–2080.
- [7] Буш А.А., Каменцев К.Е., Мещеряков В.Ф., Фетисов Ю.К., Чашин Д.В., Фетисов Л.Ю. // ЖТФ. 2009. Т. 79. С. 71–77.
- [8] Филиппов Д.А. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 23. С. 24–31.
- [9] Филиппов Д.А., Бичурин М.И., Петров В.М., Лалетин В.М., Поддубная Н.Н., Srinivasan G. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 1. С. 15–20.