УДК 537.9

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ БЕССВИНЦОВОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКА И НЕОДНОРОДНОГО МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Д.В.Коваленко, М.И.Бичурин, В.М.Петров

MAGNETOELECTRIC EFFECT IN LAMINATES OF LEAD-FREE PIEZOELECTRICAND INHOMOGENEOUS MAGNETOSTRICTIVE MATERIAL

D.V.Kovalenko, M.I.Bichurin, V.M.Petrov

Институт электронных и информационных систем НовГУ, Mirza.Bichurin@novsu.ru

Рассмотрена теоретическая модель прямого магнитоэлектрического эффекта в трехслойной структуре, образованной бессвинцовым пьезоэлектрическим слоем и двумя магнитострикционными слоями с разными знаками магнитострикции. Показано, что в структуре состава лангатат—никель—пермендюр наблюдается двукратное увеличение МЭ коэффициента по напряжению в области изгибной моды электромеханического резонанса по сравнению со структурой состава лангатат—пермендюр.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, магнитострикционно-пьезоэлектрическая структура, изгибная мода колебаний, электромеханический резонанс, бессвинцовый преобразователь

The magnetoelectric effect in a trilayer of lead-free piezoelectric and two magnetostrictive materials with opposite signs of piezomagnetic constant is modeled. Magnetoelectric voltage coefficient for the trilayer of langatate, nickel, and permendur shows a twofold increase at bending mode frequency compared to bilayer of langatate and permendur.

Keywords: magnetoelectric effect, magnetostrictive-piezoelectric structure, bending mode, electromechanical resonance, lead-free piezoelectric

Введение

Магнитоэлектрическое (МЭ) взаимодействие в материале проявляется в виде индуцирования электрической поляризации при приложении к материалу внешнего магнитного поля (прямой МЭ эффект) или в наведении намагниченности при приложении к материалу внешнего электрического поля (обратный МЭ эффект). МЭ эффект в магнитострикционнопьезоэлектрических структурах является следствием механического взаимодействия магнитной и электрической подсистем, поэтому на частотах, близких к частоте электромеханического резонанса (ЭМР) наблюдается существенное увеличение МЭ коэффициентов. Исследование частотной зависимости МЭ коэффициента по напряжению в области продольной и радиальной мод ЭМР показали, что в области ЭМР наблюдается возрастание МЭ коэффициента более чем на порядок [1]. Недавние исследования показали, что в области изгибных мод также наблюдается гигантский МЭ эффект, при этом резонансная частота изгибных колебаний сравнительно меньше, чем для продольных акустических мод [2]. Это является важным с точки зрения практического применения МЭ эффекта.

Необходимо отметить, что МЭ характеристики слоистых структур можно улучшить при использовании монокристаллических пьезоэлектриков вместо керамических сегнетоэлектриков [3]. Отсутствие пироэлектрического эффекта и фазовых переходов у монокристаллических пьезоэлектриков делает возможным наблюдение МЭ эффекта в структурах на их основе в широком диапазоне температур. Известно, что прямой МЭ эффект количественно характеризуется МЭ коэффициентом по напряжению, который пропорционален отношению пьезомодуля d к относительной диэлектрической проницаемости є_r. Для слоистой структуры, содержащей бессвинцовый пьезоэлектрик лангатат, который характеризуется $d/\varepsilon_r = 0.25$ ед. СИ, МЭ коэффициент по напряжению приблизительно в 2 раза больше по сравнению с его значением для структуры на основе цирконата-титаната свинца (*d*/ɛ_{*r*}=0,13 ед. СИ). При этом в области ЭМР наблюдается увеличение МЭ коэффициента по сравнению с композитами, содержащими оксид свинца. Это связано с более высокими значениями добротности механических колебаний для монокристаллических пьезоэлектриков. Дополнительное усиление МЭ эффекта в слоистых структурах может быть достигнуто при использовании неоднородной по составу магнитострикционной компоненты [2].

Целью настоящей работы является исследование МЭ эффекта в области изгибных мод в слоистых структурах состава бессвинцовый пьезоэлектрик неоднородная магнитострикционная компонента.

1. Теоретическое моделирование МЭ эффекта в слоистых структурах с неоднородным ферромагнетиком

В качестве примера рассмотрим изгибные колебания трехслойной структуры, состоящей из монокристаллического бессвинцового пьезоэлектрика и двух магнитострикционных слоев с разными знаками магнитострикции. Предполагается, что образец имеет форму тонкой пластинки, для которой толщина значительно меньше остальных геометрических размеров, а ширина — значительно меньше длины. МЭ коэффициент по напряжению α_E оценивается для поперечной ориентации магнитного и электрического полей, соответствующей минимальному влиянию размагничивающего поля и максимальному значению МЭ коэффициента. Для наблюдения пьезомагнитного эффекта и линеаризации МЭ свойств слоистой структуры к материалу прикладывается подмагничивающее поле H_0 . В этом случае в интервале магнитных полей, малых по сравнению с подмагничивающим полем, магнитострикция проявляется в виде пьезомагнитного эффекта, а МЭ эффект будет близок к линейному. Подмагничивающее H_0 и переменное магнитное поле H_1 параллельны оси x. Электрическое поле в пьезоэлектрической компоненте E_3 направлено перпендикулярно плоскости образца.

В основу теоретической модели МЭ эффекта положены уравнения упругости и материальные уравнения для пьезоэлектрического и магнитострикционного слоев:

$${}^{p}S_{i} = {}^{p}S_{ij} {}^{p}T_{j} + {}^{p}d_{ki} {}^{p}E_{k};$$

$${}^{p}D_{k} = {}^{p}d_{ki} {}^{p}T_{i} + {}^{p}\varepsilon_{kn} {}^{p}E_{n};$$

$${}^{m1}S_{i} = {}^{m1}s_{ij} {}^{m1}T_{j} + {}^{m1}q_{ki} {}^{m}H_{k};$$

$${}^{m1}B_{k} = {}^{m1}q_{ki} {}^{m1}T_{i} + {}^{m1}\mu_{kn} {}^{m}H_{n};$$

$${}^{m2}S_{i} = {}^{m2}s_{ij} {}^{m2}T_{j} + {}^{m2}q_{ki} {}^{m}H_{k};$$

$${}^{m2}B_{k} = {}^{m2}q_{ki} {}^{m2}T_{i} + {}^{m2}\mu_{kn} {}^{m}H_{n};$$

где S_i и T_j — компоненты тензоров деформации и механического напряжения, E_k и D_k — компоненты векторов электрического поля и электрического смещения, H_k и B_k — компоненты векторов магнитного поля и магнитной индукции, s_{ij} — податливость; q_{ki} и d_{ki} — пьезомагнитный и пьезоэлектрический коэффициенты, ε_{kn} — диэлектрическая проницаемость и μ_{kn} магнитная проницаемость. Верхние индексы p, m относятся к пьезоэлектрической и пьезомагнитной фазам соответственно, индекс m1 относится к верхнему слою магнитной фазы, m2 — к нижнему (граничащему с пьезоэлектриком) слою.

Изгибные колебания образца описываются уравнением [4]

$$\nabla^2 \nabla^2 w + \frac{\rho t}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} = 0, \qquad (1)$$

где w — прогиб (смещение в направлении z), t и ρ — толщина и средняя плотность образца, τ — время. В случае трехслойной структуры $t = {}^{p}t + {}^{m1}t + {}^{m2}t$, где ${}^{m1}t$ и ${}^{m2}t$ — толщины двух магнитострикционных слоев, ${}^{p}t$ — толщина пьезоэлектрического слоя.

Вращающий момент относительно оси *у* в расчете на единицу ширины образца определяется как

$$M_{x} = \int_{z_{0}-p_{t}}^{z_{0}} z \cdot p^{1} T_{1} dz + \int_{z_{0}}^{z_{0}+m_{t}} z \cdot m^{1} T_{1} dz + \int_{z_{0}+m_{t}}^{z_{0}+m_{t}+m_{2}} z \cdot m^{2} T_{1} dz, \qquad (2)$$

где *z*₀ — расстояние от срединной плоскости до поверхности плоскости раздела слоистой структуры.

Среднее значение напряженности индуцированного электрического поля *Е* определяется по формуле

$$E = \frac{1}{t} \int_{z_0 - p_t}^{z_0} {}^p E_3 dz.$$
 (3)

Внутреннее электрическое поле в пьезоэлектрической компоненте ${}^{p}E_{3}$ находится при использовании условия разомкнутой цепи, которое имеет вид

$$\int_{0}^{L} {}^{p} D_{3} dx = 0.$$
 (4)

Использование формулы (4) позволяет получить выражение для ${}^{p}E_{3}$ в виде:

$${}^{p}E_{3} = \frac{{}^{p}d_{11} \cdot {}^{p}Y^{E}}{L \cdot {}^{p}\varepsilon_{11} \cdot (1 - {}^{p}K_{11}{}^{2})} \int_{0}^{L} \frac{d^{2}}{dx^{2}} w(x) dx.$$
(5)

Ограничимся рассмотрением гармонических колебаний, для которых прогиб определяется выражением

$$w(x,\tau) = w(x) \cdot \cos(\omega \cdot \tau), \qquad (6)$$

где о — круговая частота.

Подстановка (6) в уравнение (1) позволяет получить общее решение этого уравнения следующим образом:

$$w(x) = C_1 \cdot \sinh(kx) + C_2 \cdot \cosh(kx) + C_3 \cdot \sin(kx) + C_4 \cdot \cos(kx), (7)$$

где волновое число равно $k^4 = \frac{\omega^2 \rho t}{D}$.

Выражение (5) с учетом (7) приводит к выражению для МЭ коэффициента по напряжению для структуры лангатат (х-срез)—пермендюр—никель:

$$\alpha_{E31} = \frac{{}^{p}Y^{p}d_{11}(a_{1}^{m1}q_{11} + a_{2}^{m2}q_{11})(r_{1}r_{4} + r_{2}r_{3})}{2^{p}\varepsilon_{11}kL(1 + r_{1}r_{3})}, \qquad (8)$$

где
$$a_1 = \frac{1}{2D}^{m_1} Y[(z_0 - {}^{m_1}t)^2 - z_0^2](t_p - 2z_0),$$

 $a_2 = \frac{1}{2D}^{m_2} Y[(z_0 + {}^{m_1}t + {}^{m_2}t)^2 - (z_0 + {}^{m_1}t)^2](t_p - 2z_0),$

D — цилиндрическая жесткость образца.

В выражении (8) предполагается, что ${}^{m}K_{11}^{2} \ll 1$, ${}^{p}K_{11}^{2} \ll 1$. Это предположение приводит к существенному упрощению выражения.

Выражение (8) показывает, что величина МЭ коэффициента определяется произведением пьезоэлектрического модуля и линейной комбинацией пьезомагнитных коэффициентов слоев. При этом коэффициенты при пьезомагнитных модулях слоев определяются упругими свойствами слоев и их толщинами. Резонансные частоты определяются выражением $\cos(kL)\cdot\cosh(kL) = -1$, что совпадает с выражением для резонансной частоты тонкой пластинки с консольным закреплением. Учет квадратов коэффициентов электромеханической и пьезоэлектрической связи ведет к небольшому смещению резонансных частот.

2. Численные оценки магнитоэлектрического коэффициента для слоистой структуры на основе ЦТС, никеля и пермендюра

При численных оценках резонансные потери учитываются с помощью комплексной частоты $\omega + i\omega'$ при $\omega'/\omega = 10^{-2}$.

Численные оценки по предложенной модели проведены для слоистой структуры на основе ЦТС, никеля и пермендюра. Расчеты по формуле (8) показали, что наибольший МЭ эффект достигается для структуры с отношением толщин первого и второго магнитных слоев, равным 0,5. Результаты вычислений частотной зависимости МЭ коэффициента по напряжению для структуры ЦТС-пермендюр-никель приведены на рис.1. Расчеты выполнены для образца длиной L = 6.8 см и суммарной толщиной 0,5 мм.



Рис.1. Зависимость максимального значения МЭ коэффициента по напряжению (1) и частоты ЭМР (2) от объемной доли пьезоэлектрика для структуры ЦТС—пермендюр—никель для образца длиной *L* = 6,8 см и суммарной толщиной 0,5 мм

Используемые материальные параметры приведены в таблице.

Коэффициенты податливости *s*, пьезоэлектрический и пьезомагнитный модули *d* и *q*, диэлектрическая проницаемость є для лангатата, никеля и пермендюра

Материал	<i>s</i> ₁₁ , пм ² /Н	<i>d</i> ₁₁ , пм/В	ϵ_{11}/ϵ_0	<i>q</i> ₁₁ , пм/А
Лангатат	9,0	-7,4	20	
Никель	4,9			-4140
Пермендюр	7,8			12000

Частотная зависимость МЭ коэффициента по напряжению для структур ЦТС—пермендюр никель, ЦТС—пермендюр и ЦТС—никель для образца с суммарной толщиной 0,5 мм для объемной доли пьезоэлектрика 0,4 приведена на рис.2.



Рис.2. Частотная зависимость МЭ коэффициента по напряжению для структур лангатат—пермендюр—никель (1), лангатат—пермендюр (2) и лангатат—никель (3) для образца длиной *L* = 6,8 см, суммарной толщиной 0,5 мм для объемной доли пьезоэлектрика 0,4

Как следует из рис.2, максимальное значение МЭ коэффициента для структуры ЦТС—пермендюр никель превышает значение этого коэффициента для структур ЦТС—пермендюр и ЦТС—никель в 2-3 раза.

Выводы

Представлены результаты моделирования МЭ эффекта в области изгибной моды для слоистых структур со ступенчатым изменением магнитострикционных свойств. Асимметрия структуры используется для возбуждения изгибных колебаний посредством магнитострикционных деформаций магнитного слоя во внешнем магнитном поле.

Частотная зависимость МЭ коэффициента по напряжению для поперечной ориентации магнитных и электрических полей получена в результате совместного решения уравнений электростатики, магнитостатики и эластодинамики. С целью получения наиболее низкой резонансной частоты рассмотрен изгибной резонанс в слоистой структуре с консольным закреплением.

Получены явные выражения для МЭ коэффициента по напряжению через пьезоэлектрические коэффициенты, пьезомагнитные коэффициенты, упругие податливости, диэлектрическую проницаемость исходных компонент.

Показано, что для структуры лангатат пермендюр—никель максимальное значение МЭ коэффициента в 2 раза больше по сравнению со структурой лангатат—пермендюр.

В работе рассмотрены не содержащие свинца слоистые структуры на основе лангатата, которые являются экологически чистыми заменителями структур на основе пьезокерамики ЦТС, содержащей большое количество свинца. Исследованные структуры могут быть использованы в устройствах, основанных на МЭ эффекте, таких как магнитные датчики, устройства сбора энергии, многофункциональные компоненты. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №16-12-10158).

- Bichurin M.I., Filippov D.A., Petrov V.M. et al. Resonance magnetoelectric effects in layered magnetostrictivepiezoelectric composites // Phys. Rev. B. 2003. V.68. P.132408 (1-4).
- Bichurin M.I., Petrov V.M. Modeling of Magnetoelectric Effects in Composites // Springer Series in Materials Science 201, 2014. 108 p.
- Бурдин Д.А., Фетисов Л.Ю., Фетисов Ю.К. и др. Резонансный магнитоэлектрический эффект без поля смещения в монолитной структуре пьезоэлектрический лангатат–ферромагнетик с гистерезисом // Журнал технической физики. 2014. Т.84. №9. С.90-95.
- Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / Под ред. Э.И.Григолюк. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.

References

- Bichurin M.I., Filippov D.A., Petrov V.M., Laletsin V.M., Paddubnaya N.N., Srinivasan G. Resonance magnetoelectric effects in layered magnetostrictive-piezoelectric composites. Physical Review B, 2003, vol. 68, p. 132408 (1-4).
- Bichurin M.I., Petrov V.M. Modeling of magnetoelectric effects in composites. Springer Series in Materials Science. Vol. 201. Springer, New York, 2014. 108 p.
- Burdin D.A., Fetisov L.Iu., Fetisov Iu.K., Chashin D.V., Ekonomov N.A. Rezonansnyi magnitoelektricheskii effekt bez polia smeshcheniia v monolitnoi strukture p'ezoelektricheskii langatat–ferromagnetik s gisterezisom [Resonance magnetoelectric effect without a bias field in a piezoelectric langatatehysteretic ferromagnet monolithic structure]. Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics, 2014, vol. 59, no. 9, pp. 1350-1355.
- Timoshenko S., Young D.H., Weaver W. Vibration Problems in Engineering. New York, John Wiley & Sons Inc, 1974. (Russ. ed.: Timoshenko S.P., Iang D.Kh., Uiver U.; Grigoliuk E.I., ed. Kolebaniia v inzhenernom dele. Moscow, "Mashinostroenie" Publ., 1985. 472 p.).