

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В СИММЕТРИЧНЫХ И АСИММЕТРИЧНЫХ МАГНИТОСТРИКЦИОННО-ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ

¹Петров В.М., ¹Бичурин М.И.

¹ГОУ ВПО «Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого», Великий Новгород, Россия (173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, 41), e-mail: mirza.bichurin@novsu.ru

В работе проведены результаты теоретического моделирования магнитоэлектрического эффекта в слоистых магнитоэлектрических структурах с учетом изгибных деформаций. Рассмотрена точно решаемая модель для симметричных и асимметричных структур. Получены явные выражения для магнитоэлектрических коэффициентов с учетом изгибных деформаций двухслойных структур через материальные параметры компонентов структуры для продольной и поперечной ориентаций электрического и магнитных полей. Показано, что график зависимости магнитоэлектрических коэффициентов двухслойной магнитоэлектрической структуры от отношения толщин слоев имеет два максимума и минимум при приблизительно равных толщинах магнитоэлектрической и пьезоэлектрической компонент. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с данными измерений для двухслойных структур на основе феррита кобальта и цирконата-титаната свинца.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, магнитоэлектрическая структура, изгибные деформации.

MAGNETOELECTRIC EFFECT IN SYMMETRIC AND ASYMMETRIC MAGNETOSTRICTIVE-PIEZOELECTRIC LAYERED STRUCTURES

¹Petrov V.M. , ¹Bichurin M.I.

¹Novgorod State University, Veliky Novgorod, e-mail: Mirza.Bichurin@novsu.ru

Theoretical modeling results are presented in this paper for magnetoelectric coupling in layered magnetostrictive-piezoelectric structures taking into account the flexural deformations. An exactly solvable model of magnetoelectric effect in symmetric and asymmetric structures is discussed. Explicit expressions for magnetoelectric coefficients in terms of material parameters of composite components are derived to take into account the flexural deformations of magnetostrictive-piezoelectric bilayers. The magnetostrictive and piezoelectric layer thickness ratio dependence is shown to have two peaks and a minimum at approximately equal thicknesses of layers. The theoretical estimates satisfactorily agree with experimental data for cobalt ferrite- lead zirconate titanate bilayer.

Key words: magnetoelectric effect, magnetostrictive-piezoelectric structure, flexural deformations.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию физических свойств материалов, характеризующихся несколькими типами упорядочения (сегнетоэлектрическим, ферромагнитным, упругим и т.п.), т.е. мультиферроиков [5; 7]. Это обусловлено возможностью использования мультиферроиков для создания многофункциональных устройств. Взаимодействие между различными параметрами упорядочений в мультиферроиках может приводить к новым эффектам. Примером таких эффектов является магнитоэлектрический (МЭ) эффект. Композиционные МЭ-мультиферроики, содержащие пьезоэлектрическую и магнитоэлектрическую фазу, обладают гигантским МЭ-эффектом при комнатной температуре, что делает их перспективными для технических применений. В

материалах такого рода МЭ-эффект проявляется как результат магнитострикционных и пьезоэлектрических свойств компонентов. Электрическая поляризация индуцируется внешним магнитным полем в присутствии подмагничивающего поля, или индуцированная намагниченность появляется при приложении электрического поля. Количественно МЭ-эффект характеризуется МЭ-коэффициентом по напряжению, α_E , равным отношению индуцированного переменного электрического поля к приложенному магнитному переменному полю в условиях разомкнутой электрической цепи. Величина коэффициента определяется параметрами структуры, магнитными, диэлектрическими и механическими параметрами составляющих ее компонентов и частоты магнитного поля [2; 3].

Моделирование МЭ-эффекта в пленочных мультиферроиках обычно основывается на предположении, что пьезоэлектрический и магнитострикционный слои имеют хороший механический контакт. При этом пьезоэлектрический слой ограничивает деформацию магнитного слоя, обусловленную внешним магнитным полем. В несимметричной структуре осевые силы в каждом слое, направленные вдоль длины образца (ось X), создают вращающий момент относительно оси Y, направленной вдоль ширины образца. Таким образом, деформации растяжения-сжатия приводят к изгибным деформациям образца [4; 6].

Задачей данной работы является теоретическое моделирование МЭ-эффекта в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах с учетом изгибных деформаций. Основные особенности предлагаемой модели заключаются в следующем: (1) учет переменных по толщине образца механических напряжений, электрического и магнитного полей позволяет рассмотреть изгибные деформации образца; (2) получены явные выражения для МЭ-коэффициента по напряжению через материальные параметры компонентов структуры (пьезоэлектрические и пьезомагнитные коэффициенты, коэффициенты жесткости и т.п.) для продольной и поперечной ориентаций электрического и магнитных полей; (3) показано на примерах типичных магнитострикционно-пьезоэлектрических структур, что изгибные деформации вносят существенный вклад в величину МЭ-эффекта.

1. Несимметричная магнитострикционно-пьезоэлектрическая структура

В качестве примера несимметричной слоистой структуры рассмотрим двухслойную структуру, состоящую из магнитострикционного и пьезоэлектрического слоев. В предположении, что толщина слоев мала по сравнению с длиной и шириной слоев, можно использовать теорию изгиба тонких пластин [1].

Для деформаций, электрической и магнитной индукций слоев справедливы следующие уравнения:

$${}^p S_i = {}^p s_{ij} {}^p T_j + {}^p d_{ki} {}^p E_k;$$

$${}^pD_k = {}^pd_{ki}{}^pT_i + {}^p\varepsilon_{kn}{}^pE_n;$$

$${}^mS_i = {}^ms_{ij}{}^mT_j + {}^mq_{ki}{}^mH_k;$$
(1)

где pT_i , mT_i , pS_i , mS_i – компоненты тензоров напряжений и деформаций пьезоэлектрической и магнитоэлектрической фаз, соответственно, pE_n – напряженность электрического поля, pD_k – электрическая индукция, mH_k – напряженность магнитного поля, ${}^pd_{ki}$ и ${}^mq_{ki}$ – пьезоэлектрический и пьезомагнитный коэффициенты при постоянном механическом напряжении, ${}^p\varepsilon_{kn}$ – диэлектрическая проницаемость.

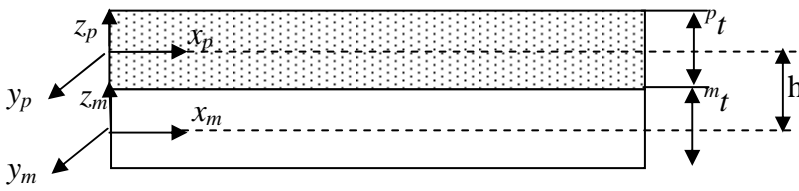


Рисунок 1 – Двухслойная магнитоэлектрично-пьезоэлектрическая структура. Оси x_p и x_m направлены вдоль длины образца в срединных плоскостях слоев. pt и mt – толщины пьезоэлектрического и магнитоэлектрического слоев, h – расстояние между x_p и x_m

Для учета изгибной деформации, связанной с несимметричностью образца, представим аксиальное смещение в виде линейной функции вертикальной координаты z_i : ${}^pu_i = {}^pu_{i0} + z_p \partial w / \partial x$; ${}^mu_i = {}^mu_{i0} + z_m \partial w / \partial x$; где ${}^iu_{i0}$ – смещение вдоль оси x при $z_i = 0$, w – смещение вдоль z , перпендикулярной плоскости образца, при этом z_i отсчитывается от срединной плоскости i -го слоя. Следует отметить, что в общем случае аксиальное смещение можно представить в виде ряда по степеням вертикальной координаты z_i . В данной работе рассматривается слабый изгиб и учитывается только линейное по z_i слагаемое.

Компоненты деформации связаны со смещением соотношениями: ${}^pS_{10} = \partial {}^pu_{10} / \partial x + z_p \partial^2 w / \partial x^2$, ${}^mS_{10} = \partial {}^mu_{10} / \partial x + z_m \partial^2 w / \partial x^2$. Очевидно, деформации ${}^iS_{10} = \partial {}^iu_{10} / \partial x$ удовлетворяют следующему условию: ${}^mS_{10} - {}^pS_{10} = h/R$, где $h = ({}^mt + {}^pt)/2$, pt , mt – толщины слоев, R – радиус кривизны изогнутого образца. С учетом приведенных выше соотношений выражения для напряжений принимают следующий вид для поперечной ориентации электрического и магнитного полей (поляризация пьезоэлектрика и электрическое поле направлены перпендикулярно плоскости образца, а постоянное и переменное магнитные поля направлены вдоль длины образца):

$${}^mT_1 = ({}^mS_{10} + z_m/R - {}^mq_{11}{}^mH_1) / {}^mS_{11},$$

$${}^pT_1 = ({}^pS_{10} + (z_p - h)/R - {}^pd_{31}{}^pE_3) / {}^pS_{11}.$$
(2)

Выражение (2) получено в предположении, что ширина слоев мала по сравнению с длиной. Для нахождения деформации ${}^m S_{10}$ учтем, что суммарная аксиальная сила равна нулю:

$$\int_{-{}^m t/2}^{{}^m t/2} {}^m T_1 dz_m + \int_{-{}^p t/2}^{{}^p t/2} {}^p T_1 dz_p = 0. \quad (3)$$

Подстановка выражений для компонентов напряжений (2) в (3) позволяет получить выражение для ${}^m S_{10}$.

$${}^m S_{10} = s_1 \left[(1-\nu) {}^m Y {}^m q_{11} H_1 + \nu {}^p Y \left({}^p d_{31} E_3 + \frac{h}{R} \right) \right], \quad (4)$$

где $\nu = {}^p t / t$ – объемная доля пьезоэлектрической компоненты, $s_1 = {}^p s_{11} + {}^m s_{11} \cdot {}^p t / {}^m t$, $t = {}^m t + {}^p t$, и ${}^m Y$, ${}^p Y$ – модули Юнга компонент структуры.

Для нахождения радиуса кривизны учтем, что сумма вращающих моментов аксиальных сил каждого слоя должна уравниваться результирующим вращающим моментом, индуцируемым в слоях структуры,

$${}^m F_1 h = {}^p M_1 + {}^m M_1, \quad (5)$$

$$\text{где } {}^i F_r = \int_{-{}^i t/2}^{{}^i t/2} {}^i T_r dz_i, \quad {}^i M_r = \int_{-{}^i t/2}^{{}^i t/2} z_i {}^i T_r dz_i,$$

Подстановка выражения для ${}^m S_{10}$ (4), а также выражения для R , полученного из уравнения (5), в (2) позволяет найти компоненты напряжений в слоях структуры. Подстановка найденного выражения для механического напряжения в пьезоэлектрическом слое в условие разомкнутой электрической цепи позволяет вычислить МЭ-коэффициент по напряжению $\alpha_{E31} = E_3 / H_1$.

$$\alpha_{E31} = - \frac{{}^p d_{31}}{{}^p t {}^p \epsilon_{33}} \int_{-{}^p t/2}^{{}^p t/2} {}^p T_1 dz = \frac{[(1-{}^p K_{31}^2) {}^p s_{11} + {}^m s_{11} r^3] {}^m q_{11} \frac{{}^p d_{31}}{{}^p \epsilon_{33}}}{(1-{}^p K_{31}^2) {}^p s_{11} [2r {}^m s_{11} (2+3r+2r^2) + {}^p s_{11}] + {}^m s_{11}^2 r^4}, \quad (6)$$

где ${}^p K_{31}$ – коэффициент электромеханической связи пьезоэлектрика, $r = {}^p t / {}^m t$.

МЭ-коэффициент по напряжению для продольной ориентации полей α_{E33} имеет вид

$$\alpha_{E33} = \frac{[(1-{}^p K_{31}^2) {}^p s_{11} + {}^m s_{11} r^3] {}^m q_{31} \frac{{}^p d_{31}}{{}^p \epsilon_{33}}}{(1-{}^p K_{31}^2) {}^p s_{11} [2r {}^m s_{11} (2+3r+2r^2) + {}^p s_{11}] + {}^m s_{11}^2 r^4}. \quad (7)$$

2. Симметричная магнитострикционно-пьезоэлектрическая структура

При рассмотрении МЭ-эффекта в симметричных структурах суммарный вращающий момент обращается в нуль, при этом радиус кривизны в уравнениях (2) и (4) следует положить равным ∞ . Таким образом, вычисление МЭ-коэффициентов сводится в

рассмотрению аксиальных деформаций. Моделирование МЭ-эффекта для этого случая рассмотрено в [6]. Выражение для МЭ-коэффициентов по напряжению симметричной магнитострикционно-пьезоэлектрической структуры в одномерном приближении для поперечной ориентации полей можно привести к виду:

$$\alpha_{E31} = \frac{{}^m q_{11} \quad {}^p d_{31} / {}^p \epsilon_{33}}{{}^p s_{11} (1 - {}^p K_{31}^2) + r {}^m s_{11}}. \quad (8)$$

Для продольной ориентации полей выражение для МЭ-коэффициента по напряжению приобретает вид

$$\alpha_{E33} = \frac{{}^m q_{31} \quad {}^p d_{31} / {}^p \epsilon_{33}}{{}^p s_{11} (1 - {}^p K_{31}^2) + r {}^m s_{11}}. \quad (9)$$

3. Результаты моделирования для двухслойных структур

Теоретическое моделирование, выполненное выше, позволило получить явные выражения для МЭ-коэффициентов по напряжению для продольной и поперечной ориентаций магнитных и электрических полей. Далее мы применим теорию расчета МЭ-эффекта к слоистой структуре феррит кобальта (ФК) - цирконат-титанат свинца (ЦТС). Так как значение α_E зависит от объемных долей фаз, МЭ-коэффициент по напряжению был определен как функция отношения толщин пьезоэлектрического и магнитострикционного слоев. Для теоретических оценок использовались следующие параметры компонентов: ${}^p s_{11} = 15.3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$, ${}^p d_{31} = -175 \text{ пм/В}$, ${}^p \epsilon_{33}/\epsilon_0 = 1750$, ${}^m s_{11} = 6.5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$, ${}^m q_{11} = -188 \text{ пм/А}$, ${}^m q_{31} = 56 \text{ пм/А}$, при этом значения пьезомагнитных модулей приведены для частоты измерений 1 кГц.

Результаты расчетов МЭ-коэффициента по напряжению для поперечной ориентации полей с использованием разработанной модели показаны на рис. 2.

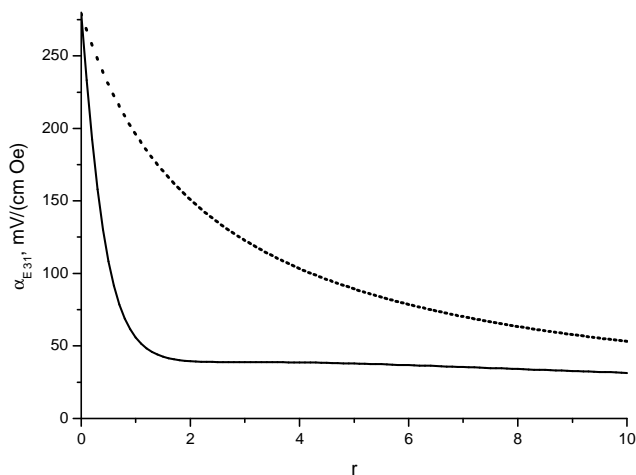


Рисунок 2 – Зависимость МЭ-коэффициента α_{E31} для двухслойной (сплошная линия) и симметричной трехслойной (пунктирная линия) структур состава ФК-ЦТС от $r = p_t/m_t$

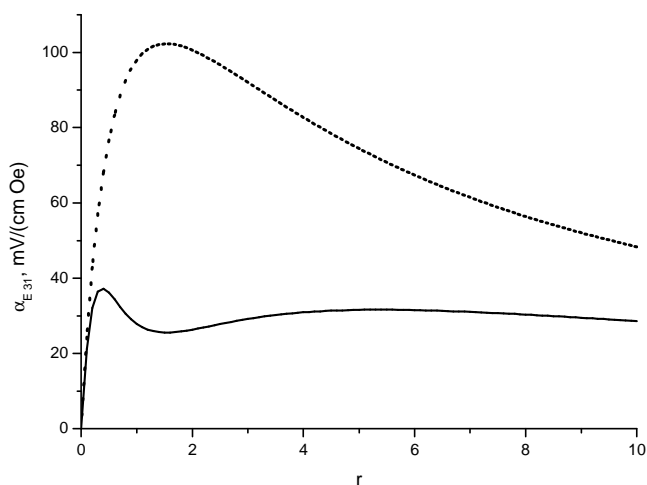


Рисунок 3 – Зависимость МЭ-коэффициента α'_{E31} , равного отношению среднего по объему образца электрического поля к внешнему магнитному полю, для двухслойной (сплошная линия) и симметричной трехслойной структур состава ФК-ЦТС $r = p_t/m_t$

Рис. 2 показывает, что МЭ-коэффициент по напряжению α_E принимает наибольшее значение при $r \rightarrow 0$. Это связано с тем, что МЭ-коэффициент определен как отношение электрического поля в пьезоэлектрическом слое к внешнему магнитному полю. При этом МЭ-коэффициент α'_E , равный отношению среднего по объему образца электрического поля к внешнему магнитному полю, обращается в нуль при $r = 0$ (рис. 3). Как следует из рис. 3, МЭ-коэффициент α'_E для двухслойной структуры значительно меньше, чем его величина для симметричной трехслойной структуры для не очень маленьких и не очень больших значений r . Это обусловлено влиянием изгиба двухслойной структуры, которое максимально при приблизительно равных толщинах пьезоэлектрического и магнитострикционного слоев. Величина МЭ коэффициента для двухслойной структуры может быть представлена в виде суперпозиции двух составляющих: (1) вследствие аксиальной деформации растяжения – сжатия и (2) вследствие чистого изгиба. Эти составляющие имеют противоположные знаки и экстремумы при $r \approx 1$. В результате график зависимости α'_E от r имеет два максимума и минимум при $r \approx 1$ (рис. 3). Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными [6] для двухслойной структуры ФК-ЦТС приведено на рис. 4 и 5.

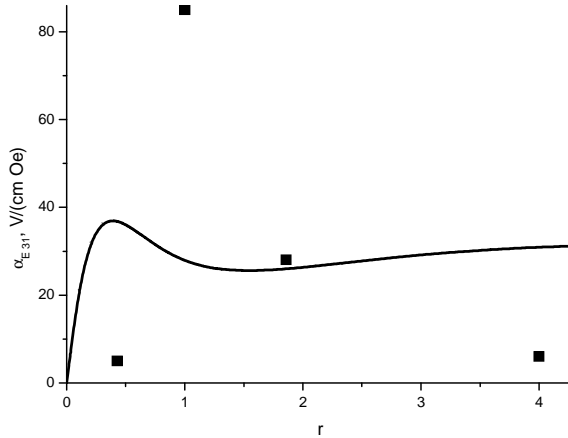


Рисунок 4 - Зависимость МЭ-коэффициента для двухслойной структуры ФК-ЦТС от $r = p_t/m_t$ для поперечной ориентации полей. Сплошная линия – расчет, точки - эксперимент

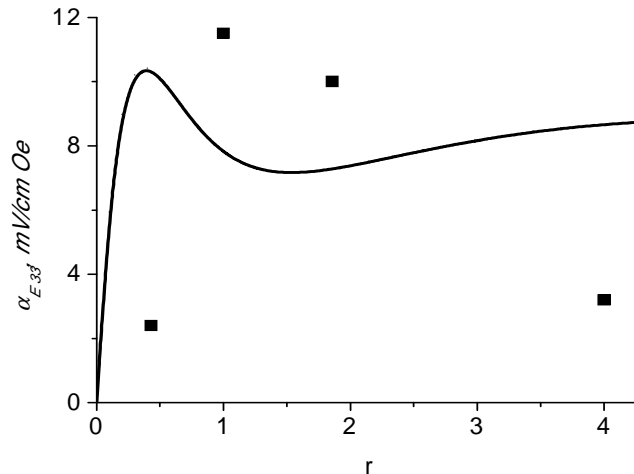


Рисунок 5 - Зависимость МЭ-коэффициента по напряжению для двухслойной структуры состава ФК-ЦТС от отношения толщин слоев $r = p_t/m_t$ для продольной ориентации магнитных и электрических полей. Сплошная линия – расчет, точки - эксперимент

Рис. 4 и 5 показывают, что результаты моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Заключение

В данной работе рассмотрена точно решаемая модель МЭ-эффекта в симметричных и асимметричных магнитоэлектрично-пьезоэлектрических структурах. Получены явные выражения для МЭ-коэффициента по напряжению с учетом изгибных деформаций. Показано, что график зависимости МЭ-коэффициента от отношения толщин слоев двухслойной структуры имеет два максимума и минимум при приблизительно равных

толщинах магнитострикционной и пьезоэлектрической компонент. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с данными измерений для двухслойных структур на основе феррита кобальта и цирконата-титаната свинца.

Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Список литературы

1. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле / Янг Д.Х., Уивер У. - М. : Машиностроение, 1985. – 472 с.
2. Bichurin M.I. Modeling of magnetoelectric effect in ferromagnetic/piezoelectric multilayer composites / Petrov V.M. and Srinivasan G. // *Ferroelectrics*, 2002, V. 280. – P. 165–175.
3. Bichurin M.I. Theory of low-frequency magnetoelectric effects in ferromagnetic-ferroelectric layered composites / Petrov V.M. and Srinivasan G. // *Journal of Applied Physics*, 2002, V. 92, № 12. – P. 7681–7683.
4. Bichurin M.I. Theory of low-frequency magnetoelectric coupling in magnetostrictive-piezoelectric bilayers / Petrov V.M. and Srinivasan G. // *Physical Review B*, 2003, V. 68, № 5. – P. 054402 (1-13).
5. *Magnetoelectricity in Composites* / Ed. M. Bichurin and D. Viehland. – Pan Stanford Publishing, 2011. – 286 p.
6. Petrov V.M. Theory of magnetoelectric effect for bending modes in magnetostrictive-piezoelectric bilayers / Srinivasan G., Bichurin M.I. // *Journal of Applied Physics*, 2009, V. 105, № 6. – Article ID 063911.
7. Petrov V.M. Flexural deformation and bending mode of magnetoelectric nanobilayer / Bichurin M.I., Zibtsev V.V. // *Journal of Applied Physics*, 2009, V. 106, № 11. – Article ID 113901.

Рецензенты:

Захаров А.Ю., д.ф.-м.н., профессор, заведующий секцией кафедры общей и экспериментальной физики ИЭИС «НовГУ», г. Великий Новгород.

Селезнев Б.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ФТТМ ИЭИС «НовГУ» г. Великий Новгород.