

05,06

Магнитоэлектрический эффект в трехслойных асимметричных структурах в области изгибных мод колебаний

© Д.А. Филиппов¹, Т.А. Galichyan², J. Zhang³, Ying Liu⁴, Yajun Qi⁴, Tianjin Zhang⁴, G. Srinivasan⁵

¹ Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, Великий Новгород, Россия,

² Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences of Armenia, 0019, Yerevan, Armenia

³ College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, 450002, Zhengzhou, China

⁴ Materials Science and Engineering Department, Hubei University, Wuhan 430062, China

⁵ Physics Department, Oakland University, 48309, Rochester, Michigan, USA

E-mail: dmitry.filippov@novsu.ru

Поступила в Редакцию 5 марта 2020 г.

В окончательной редакции 5 марта 2020 г.

Принята к публикации 14 марта 2020 г.

Представлена теория магнитоэлектрического эффекта в трехслойных асимметричных структурах, состоящих из пьезоэлектрического слоя и двух магнитострикционных слоев с противоположными знаками магнитострикции. Получено соотношение между толщинами слоев, при котором величина эффекта имеет максимальное значение. Показано, что при увеличении толщины третьего слоя происходит изменение знака магнитоэлектрического коэффициента на противоположный, относительно знака первоначальной двухслойной структуры. Установлено, что магнитоэлектрические коэффициенты у структур с различным чередованием слоев с положительной и отрицательной магнитострикцией, имеют противоположные знаки.

Ключевые слова: магнитострикция, пьезоэлектричество, магнитоэлектрический эффект, асимметричные структуры, композиционные мультиферроики.

DOI: 10.21883/FTT.2020.08.49600.049

1. Введение

Композиционные магнитострикционно-пьезоэлектрические структуры являются перспективными материалами для их использования в устройствах стрейнтроники — нового направления электроники [1]. Потенциальные возможности применения таких материалов возможно благодаря наличию в них магнитоэлектрического (МЭ) эффекта, который заключается в изменении поляризации вещества под действием магнитного поля (прямой МЭ-эффект) и, наоборот, в изменении намагниченности под действием электрического поля (обратный или инверсный МЭ-эффект). Благодаря наличию МЭ-эффекта на их основе возможно создание устройств, в которых управление осуществляется одновременно как электрическим, так и магнитным полями [2–5]. Механизмом возникновения МЭ-эффекта в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах является механическое взаимодействие магнитострикционной и пьезоэлектрической компонент, вследствие чего величина эффекта определяется значениями пьезоэлектрического коэффициента и магнитострикции. До настоящего времени широко исследовались двухслойные структуры с последовательным [6,7] и параллельным [8–15] расположением слоев, различной геометрической формы

и состава с целью получения максимальной величины МЭ-взаимодействия. МЭ-эффект в слоистых структурах связан с распространением планарных колебаний, изгибных колебаний и толщинных колебаний. Резонансная частота эффекта определяется геометрическими характеристиками структуры, модулями Юнга и плотностью материала слоев и способами закрепления структуры. Для толщинных колебаний резонансная частота наиболее высокая, а для изгибных мод резонансная частота наиболее низкая. Следует отметить, что для трехслойных симметричных структур изгибные моды отсутствуют и реализуются только планарные и толщинные колебания. В двухслойных магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах одновременное наличие планарных и изгибных деформаций приводит к тому, что константа магнитоэлектрического взаимодействия меняет знак в зависимости от направления поля подмагничивания относительно кристаллографических осей магнетика [16]. При изгибных колебаниях в двухслойных структурах величина МЭ-эффекта зависит от физических параметров и соотношения толщин магнитострикционного и пьезоэлектрического слоев [17,18]. Для усиления величины МЭ-взаимодействия в работах [19,20] использовалась биморфная структура, состоящая из двух магнитострикционных слоев с разными знаками

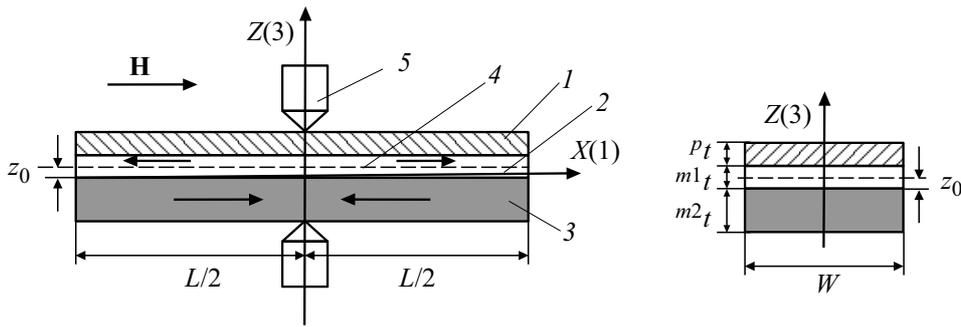


Рис. 1. Схематическое изображение трехслойной структуры. 1 — слой PZT, 2 — первый магнитоэлектрический слой с положительной (отрицательной) магнитоэлектрической, 3 — второй магнитоэлектрический слой с отрицательной (положительной) магнитоэлектрической, 4 — нейтральная линия, 5 — электроды.

магнитоэлектрики и расположенных между ними двумя слоями пьезоэлектрика с противоположными направлениями поляризации. Величина МЭ-коэффициента в таких структурах превышает величину МЭ-коэффициента в двухслойных структурах со схожими параметрами. Недостатками таких структур являлось необходимость поляризовать слои пьезоэлектрика в противоположных направлениях, что затрудняет процесс изготовления структур. Кроме того, слои пьезоэлектрика расположены в середине структуры, вблизи нейтральной линии. Как хорошо известно, величина деформации при изгибе линейно возрастает по мере удаления от нейтральной линии. В связи с этим, с целью получения максимальной величины МЭ-взаимодействия пьезоэлектрический слой следует располагать как можно дальше от нейтральной линии. В данной работе рассмотрена трехслойная асимметричная структура и проанализирована зависимость величины эффекта от параметров пьезоэлектрического и магнитоэлектрического слоев.

2. Теория магнитоэлектрического эффекта в трехслойных асимметричных структурах при изгибных колебаниях

Асимметричные трехслойные структуры представляют большой интерес для исследований, поскольку они позволяют достичь большей, по сравнению с двухслойными структурами, эффективности преобразования магнитного поля в электрическое поле. Использование материалов с положительной и отрицательной магнитоэлектрической увеличивает изгибающий момент, что ведет к увеличению деформаций в пьезоэлектрическом слое и, как следствие, усилению МЭ-связи.

Из теории изгиба [21] можно получить следующие положения:

1) напряжения по разные стороны от нейтральной линии имеют разные знаки, следовательно, структуры, у которых нейтральная линия совпадает с границей

раздела между магнитоэлектрическими слоями с положительной и отрицательной магнитоэлектрической будет иметь максимальную эффективность;

2) величина напряжений линейно возрастает с увеличением расстояния от нейтральной линии, следовательно, максимальную эффективность будут иметь структуры, у которых пьезоэлектрический слой расположен на максимально возможном расстоянии от нейтральной линии;

3) положение нейтральной линии определяется толщиной слоев структуры. Изменение толщины одного из слоев ведет к сдвигу нейтральной линии и, как следствие, может привести к изменению знака деформаций в пьезоэлектрическом слое.

Мы рассмотрим трехслойную структуру пьезоэлектрик/магнетик 1/магнетик 2 с противоположными знаками магнитоэлектрической. Схематическое изображение такой структуры показано на рис. 1. Начало системы координат совместим с центром образца, а ось X (1) совместим с границей раздела между слоями с положительной и отрицательной магнитоэлектрической.

В дальнейшем мы будем предполагать, что длина образца много больше его ширины и толщины. В этом приближении материальные уравнения для пьезоэлектрической и магнитоэлектрических фаз будут иметь следующий вид:

$${}^p S_1 = \frac{1}{{}^p Y} {}^p T_1 + {}^p d_{31} E_3, \quad (1)$$

$${}^{m1} S_1 = \frac{1}{{}^{m1} Y} {}^{m1} T_1 + {}^{m1} q_{11} H_1, \quad (2)$$

$${}^{m2} S_1 = \frac{1}{{}^{m2} Y} {}^{m2} T_1 + {}^{m2} q_{11} H_1, \quad (3)$$

$${}^p D_3 = {}^p \epsilon_{33} E_3 + {}^p d_{31} T_1, \quad (4)$$

где ${}^p S_1, {}^{m1} S_1, {}^{m2} S_1$ — компоненты тензора деформаций пьезоэлектрического, первого и второго магнитоэлектрических слоев, ${}^p Y, {}^{m1} Y, {}^{m2} Y$ — их модули Юнга, ${}^p E_3, {}^p D_3$ — компоненты вектора напряженности электрического поля и электрической индукции, ${}^p T_1, {}^{m1} T_1, {}^{m2} T_1$ —

компоненты тензора напряжений пьезоэлектрической и магнитострикционной фаз, ${}^p d_{31}$, ${}^m q_{11}$, ${}^m q_{11}$ — пьезоэлектрический и пьезомагнитные коэффициенты, ${}^p \epsilon_{33}$ — компонента тензора диэлектрической проницаемости пьезоэлектрика.

Используя гипотезу Бернулли, и условие равенства нулю X — проекции результирующей силы, для координаты нейтральной линии z_0 получим следующее выражение:

$$z_0 = \frac{1}{2} \frac{{}^p Y p t^2 + 2 {}^p Y p t m^1 t + m^1 Y m^1 t^2 - m^2 Y m^2 t^2}{\bar{Y} t}, \quad (5)$$

где $p t$, $m^1 t$, $m^2 t$ — толщины слоев, $t = m^1 t + m^2 t + p t$ — полная толщина образца, $\bar{Y} = ({}^p Y p t + m^1 Y m^1 t + m^2 Y m^2 t)/t$ — среднее значение модуля Юнга.

Параметр z_0 может быть как положительным, так и отрицательным. Структура будет оптимальной, если его значение будет равно $z_0 = 0$. В этом случае нейтральная линия будет лежать на границе раздела между слоями, испытывающими растяжение и сжатие.

Используя уравнение (5), получим соотношение между толщинами слоев для оптимальной асимметричной структуры в виде:

$$m^2 Y m^2 t^2 = {}^p Y p t^2 + m^1 Y m^1 t^2 + 2 {}^p Y m^1 t p t \quad (6)$$

Уравнение (6) позволяет, зная толщину двух слоев, легко определить оптимальную толщину третьего слоя.

Уравнение движения для изгибных колебаний трехслойной структуры, согласно [22], может быть записано в следующей форме:

$$\bar{\rho} t \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = 0, \quad (7)$$

где w — смещение в z -направлении нейтральной плоскости в точке с координатой x , $\bar{\rho}$ — средняя плотность образца, τ — время, D — жесткость при изгибе. Для трехслойной структуры, изображенной на рис. 1, средняя плотность и жесткость определяются выражениями

$$\bar{\rho} = (m^1 \rho m^1 t + m^2 \rho m^2 t + p \rho p t)/t, \quad (8)$$

$$D = (m^1 Y m^1 J_{y_0} + m^2 Y m^2 J_{y_0} + {}^p Y p J_{y_0})/W. \quad (9)$$

Здесь W — ширина образца, $m^1 \rho$, $m^2 \rho$, $p \rho$ — соответствующие плотности магнитострикционных слоев и пьезоэлектрического слоя,

$${}^p J_0 = W \left(\frac{1}{12} p t^3 + p t (p t/2 + m^1 t - z_0)^2 \right),$$

$$m^1 J_0 = W \left(\frac{1}{12} m^1 t^3 + m^1 t (m^1 t/2 - z_0)^2 \right),$$

$$m^2 J_0 = W \left(\frac{1}{12} m^2 t^3 + m^2 t (-m^2 t/2 - z_0)^2 \right)$$

— осевые моменты инерции сечений относительно нейтральной оси.

Поскольку слои тонкие, то мы можем предположить, что деформации в каждом слое одинаковые, т.е. ${}^p S_1 = m^1 S_1 = m^2 S_1 = S_1$. Искомые деформации связаны со смещениями с помощью соотношения [22]:

$$S_1 = -(z - z_0) w''(x). \quad (10)$$

Временную зависимость смещений представим в виде $w(t, x) = \exp(i\omega\tau)w(x)$, где ω — круговая частота. Используя это представление, для смещений получим уравнение в следующей форме:

$$\frac{\partial^4}{\partial x^4} w - k^4 w = 0, \quad (11)$$

где $k^2 = \sqrt{\frac{\bar{\rho}}{D}} \omega$ — квадрат волнового числа. Решение уравнения (11) может быть записано в форме

$$w(x) = C_1 \cos(kx) + C_2 \cosh(kx) + C_3 \sin(kx) + C_4 \sinh(kx). \quad (12)$$

Здесь $C_1 \dots C_4$ — постоянные интегрирования, которые определяются из граничных условий.

МЭ-коэффициент по напряжению (MEVC) $\alpha + E$ мы получим, используя условие разомкнутой цепи $I = 0$, которое в данном случае, преобразуется к виду

$$\int_{-L/2}^{L/2} (\epsilon_3 E_3 + {}^p d_{31} p T + 1) dx = 0. \quad (13)$$

Используя уравнение (1) уравнение (10) и подставляя решение (12) в уравнение (13), после интегрирования, мы получим для напряженности электрического поля следующее выражение:

$$\epsilon_3 (1 - k_p^2) E_3 L + 2k {}^p d_{31} p Y (z - z_0) \times (C_1 \sin \kappa - C_2 \sinh \kappa) = 0, \quad (14)$$

где $k_p^2 = \frac{{}^p d_{31}^2}{\epsilon_3}$ — квадрат коэффициента электромеханической связи и $\kappa = kL/2$ — безразмерный параметр. Как можно видеть из уравнения (14), нечетные функции, входящие в решение (12) не дают вклада в электрическое поле. Это объясняется тем, что вклады от этих функций имеют разные знаки относительно начала системы координат.

Граничные условия, необходимые для определения постоянных интегрирования $C_1 \dots C_4$, зависят от способа закрепления образца. Для образца с двумя свободными концами, схематично изображенного на рис. 1, будут иметь место следующие граничные условия: на свободных концах, в точках $x = \pm L/2$ момент силы и

поперечная сила равны нулю, т. е.

$$M_y(x) = \int_0^w dy \left(\int_{-m^2t}^0 (z - z_0)^{m^2} T_1 dz + \int_0^{m^1t} (z - z_0)^{m^1} T_1 dz + \int_{m^1t}^{m^1t+p^1t} (z - z_0)^p T_1 dz \right) \Big|_{x=\pm L/2} = 0 \quad (15)$$

$$Q_z = \frac{\partial M_y(x)}{\partial x} \Big|_{x=\pm L/2} = 0. \quad (16)$$

Используя уравнение. (1)–(3) и проводя интегрирования, мы получим для необходимых нам констант интегрирования следующие выражения:

$$C_1 = \frac{1}{Dk^2} \frac{\sinh \kappa}{\Delta} [B_m H_1 + B_p E_3], \quad (17)$$

$$C_2 = \frac{1}{Dk^2} \frac{\sin \kappa}{\Delta} [B_m H_1 + B_p E_3], \quad (18)$$

где $\Delta = \cos \kappa + \sin \kappa \cosh \kappa$. Коэффициенты B_m и B_p определяются следующими выражениями:

$$B_m = (0.5^{m^1t} - z_0)^{m^1} q_{11}^{m^1} t^{m^1} Y + (0.5^{m^2t} + z_0)^{-m^2} q_{11}^{m^2} t^{m^2} Y, \quad (19)$$

$$B_p = (0.5^{p^1t} + m^1t - z_0)^p d_{31}^{p^1} t^{p^1} Y \quad (20)$$

Эти коэффициенты определяют амплитуду колебаний. Легко видеть, что величина $B_m W H_1$ представляет собой суммарный изгибающий момент, создаваемый магнито-стрикционными слоями, а величина $B_p W E_3$ является изгибающим моментом, создаваемым пьезоэлектрическим слоем в результате возникновения в нем индуцированного электрического поля. Как видно из уравнений (19) и (20), и коэффициенты B_m и B_p зависят от физических параметров слоев и их геометрических характеристик.

Согласно определению MEVC α_E находится из соотношения

$$\alpha_E = \langle E_3 \rangle / H_1, \quad (21)$$

где среднее значение электрического поля $\langle E_3 \rangle$ для данной структуры может быть найдено из выражения

$$\langle E_3 \rangle = \frac{1}{p^1t} \int_{m^1t}^{m^1t+p^1t} E_3 dz, \quad (22)$$

Подставляя выражения (17) и (18) в уравнение (12) и затем в уравнение (22) и используя определение MEVC (21) получим для него выражение в виде

$$\alpha_E = \frac{2^p Y^p d_{31} (0.5^{p^1t} + m^1t - z_0) B_m \sinh \kappa \sin \kappa}{\varepsilon_3 D \kappa \Delta_\alpha}, \quad (23)$$

где

$$\Delta_\alpha = (1 - k_p^2) \Delta + 2k_p^2 \frac{pYB_p(0.5^{p^1t} + m^1t - z_0) \sinh \kappa \sin \kappa}{D^p d_{31} \kappa}$$

— параметр, определяющий резонансные свойства структуры с учетом электромеханической связи. Если этот параметр равен нулю, то наблюдается электромеханический резонанс, при котором имеет место пиковое увеличение MEVC. Учет потерь можно учесть с помощью коэффициента затухания ξ представив круговую частоту в виде $\omega = \omega' + i\xi$, где ω' — действительная часть комплексной частоты ω . Коэффициент затухания связан с добротностью структуры Q соотношением $\xi = \pi f_{res} / Q$.

Значение параметра $k_p^2 \ll 1$, поэтому условие $\Delta_\alpha = 0$ приближенно соответствует условию $\Delta = 0$, которое дает резонансные частоты изгибных колебаний стержня с двумя свободными концами. Первый резонансный пик наблюдается, когда параметр $\kappa = kL/2 = 2.365 \approx 3\pi/4$. Это дает для первой резонансной частоты значение

$$f_1 \approx 1.125 \frac{\pi}{L^2} \sqrt{\frac{D}{\rho t}}. \quad (24)$$

Для низкочастотной области, когда параметр $\kappa \ll 1$, разлагая функции в ряд по малому параметру κ , мы получим

$$\alpha_E^{Low} = \frac{pY^p d_{31} (0.5^{p^1t} + m^1t - z_0) B_m}{\varepsilon_3 D (1 - k_p^2)}. \quad (25)$$

Уравнение (25) дает зависимость низкочастотного значения MEVC от значений физических параметров пьезоэлектрического и магнито-стрикционных слоев и их геометрических размеров.

3. Результаты и обсуждение

Как следует из уравнения (25) при неизменных параметрах пьезоэлектрического слоя наибольшего значения MEVC будет достигать тогда, когда будет максимально отношение $\frac{B_m}{D}$. Параметр D представляет собой жесткость при изгибе и его значение зависит от толщины и модулей Юнга слоев. Значение параметра B_m зависит от пьезомагнитных коэффициентов и толщин магнито-стрикционных слоев, а также от положения нейтральной линии. Легко видеть, что значение B_m будет максимальным, если параметр $z_0 = 0$. Это будет тогда, когда нейтральная линия будет совпадать с границей раздела между слоями с положительной и отрицательной магнито-стрикцией. Это условие определяет соотношение между параметрами асимметричной структуры для достижения максимальной МЭ-связи.

Зависимость параметра B_m от толщин магнито-стрикционных слоев может привести к смене знака MEVC. В случае переменных полей при положительном значении MEVC фаза колебаний индуцированного электрического поля совпадает с фазой колебаний магнитного по-

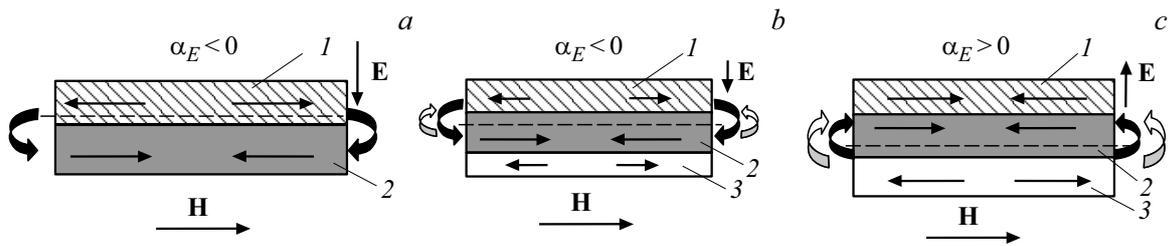


Рис. 2. Схематичное изображение структуры и изгибающих моментов при различных толщинах второго магнитострикционного слоя.

ля, его вызвавшего. При отрицательном значении MEVC колебания электрического и магнитного поля происходят в противофазе. В качестве примера рассмотрим двухслойную структуру PZT/Ni и трехслойную асимметричную структуру PZT/Ni/Terfenol-D с неизменными значениями параметров первых двух слоев PZT и Ni и различной толщиной третьего слоя Terfenol-D. Схематичное изображение этих структур представлено на рис. 2.

Никель обладает отрицательной магнитострикцией, и магнитное поле приводит к сжатию слоев никеля. Нейтральная линия для двухслойной структуры PZT/Ni будет лежать ниже середины слоя PZT и выше середины слоя никеля, что приводит в результате к изгибу структуры и в целом растяжению слоев PZT (рис. 2, a).

Когда мы добавляем третий слой Terfenol-D, нейтральная линия опускается вниз и одновременно возникает дополнительный изгибающий момент, возникающий от слоя Terfenol-D с положительной магнитострикцией, направленный противоположно изгибающему моменту, создаваемому слоем никеля. Однако, при малых толщинах Terfenol-D слоя изгибающий момент от Terfenol-D слоя меньше, чем изгибающий момент от слоя Ni, суммарный момент уменьшается, MEVC также уменьшается, но знак коэффициента не изменяется (рис. 2, b).

При дальнейшем увеличении толщины слоя Terfenol-D нейтральная линия продолжает смещаться вниз, изгибающий момент Ni уменьшается, а изгибающий момент Terfenol-D возрастает, суммарный момент уменьшается и когда изгибающий момент Ni будет равен изгибающему моменту Terfenol-D, то тогда MEVC будет равен нулю. Как уже отмечалось ранее, величина B_mWH_1 представляет собой суммарный изгибающий момент, создаваемый магнитострикционными слоями, поэтому равенство нулю суммарного изгибающего соответствует условию $B_m = 0$. Это условие определяет толщину третьего слоя, при которой MEVC изменяет знак.

При дальнейшем увеличении толщины Terfenol-D слоя нейтральная линия продолжает смещаться вниз и когда она сместится ниже середины слоя Ni, то тогда изгибающий момент Ni изменяет знак и после этого изгибающие моменты Ni и Terfenol-D будут направлены одинаково и взаимно усиливают друг друга, при этом MEVC будет выше, чем у двухслойных PZT/Ni или PZT/Terfenol-D структур (рис. 2, c).

На рис. 3 и 4 показаны зависимости низкочастотного значения MEVC асимметричных трехслойных структур PZT/Ni/Terfenol-D и PZT/Terfenol-D/Ni от толщины тре-

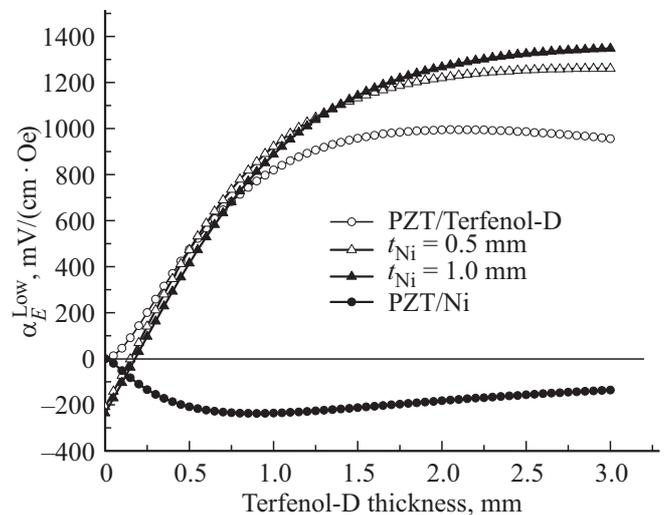


Рис. 3. Зависимость низкочастотного значения MEVC в структуре PZT/Ni/Terfenol-D от толщины второго магнитострикционного слоя.

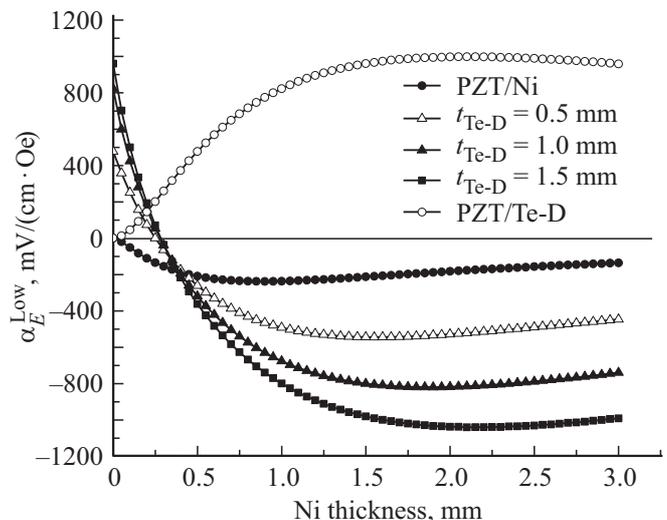


Рис. 4. Зависимость низкочастотного значения MEVC в структуре PZT/Terfenol-D/Ni от толщины второго магнитострикционного слоя.

Параметры материалов композиционных структур

Материал	Модуль Юнга, Y , GPa	Плотность, ρ , kg/m ³	Пьезомодули d_{31} , pC/N; q_{11} , ppm/Oe	Диэлектрическая проницаемость ϵ
PZT	66.7	8.2	-175	1750
Ni	215	8.9	-0.06	—
Terfenol-D	62.5	8.5	0.3	—
Metglas	110	8.2	0.3	—

тьего слоя соответственно при неизменных значениях толщин двух первых слоев. Там же представлены для сравнения зависимости MEVC для двухслойных структур PZT/Ni и PZT/Terfenol-D от толщины магнитоэлектрического слоя. При расчетах использовались параметры слоев, представленные в таблице.

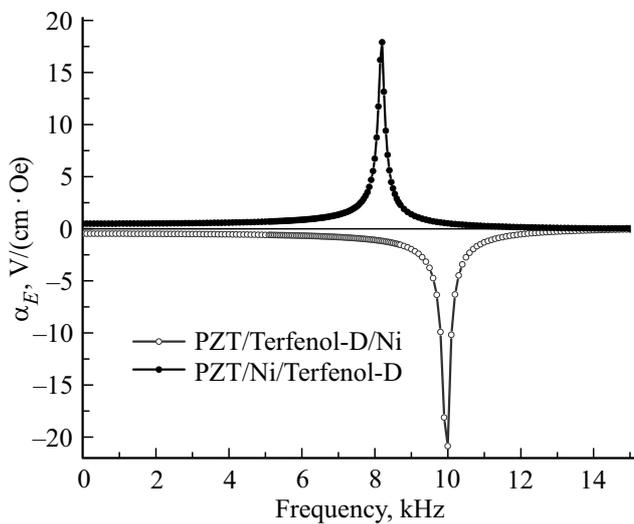


Рис. 5. Теоретическая частотная зависимость MEVC в структуре PZT/Ni/Terfenol-D и PZT/Terfenol-D/Ni.

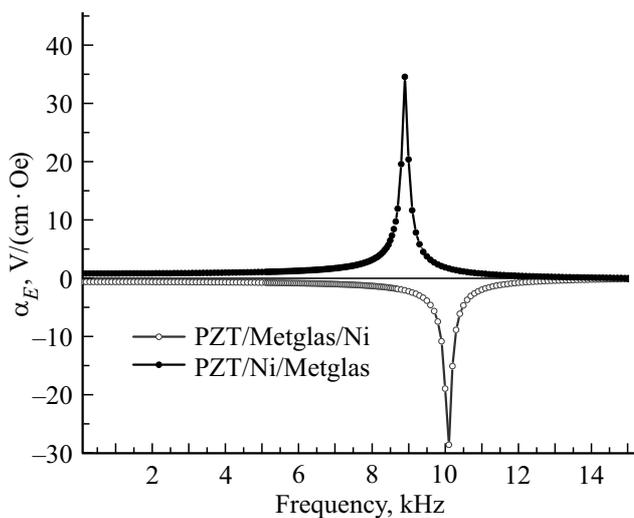


Рис. 6. Теоретическая частотная зависимость MEVC в структуре PZT/Ni/Metglas и PZT/Metglas/Ni.

Как видно из рис. 3 и 4, при малых толщинах третьего слоя знак MEVC совпадает со знаком MEVC первоначальной двухслойной структуры, затем знак меняет знак и при дальнейшем увеличении третьего слоя величина MEVC достигает максимума, а затем начинается его уменьшение, как и для двухслойной структуры. Величина MEVC для трехслойных асимметричных структур в максимуме превышает значение MEVC для двухслойных структур. Так для структуры PZT/Ni/Terfenol-D значение MEVC в максимуме в 5.6 раза больше, чем для двухслойной структуры PZT/Ni и также почти на 40% превышает его значение для двухслойной структуры PZT/Terfenol-D.

Поскольку пьезомагнитный коэффициент Terfenol-D в пять раз больше пьезомагнитного коэффициента Ni, то вклад в эффект от Terfenol-D слоя является преобладающим и Ni вносит дополнительный вклад в MEVC для PZT/Terfenol-D структуры.

На рис. 5 и 6 представлены частотные характеристики, рассчитанные по формуле (23), для асимметричных трехслойных структур на основе пьезоэлектрического слоя PZT, магнитоэлектрического слоя Ni с отрицательной магнитоэлектрической и с положительной магнитоэлектрической из Terfenol-D (рис. 5) и метгласа (рис. 6) с различным чередованием слоев с положительной и отрицательной магнитоэлектрической, в области первой моды изгибных колебаний. При расчетах использовались геометрические параметры структур: ширина всех слоев $W = 5$ mm, длина пьезоэлектрического слоя $L_p = 20$ mm, его толщина $t_p = 0.3$ mm, длина магнитоэлектрических слоев $L_{m1} = L_{m2} = 15$ mm, толщина слоя никеля $t_{Ni} = 0.3$ mm, толщина слоев с положительной магнитоэлектрической $t_{Te} = 0.15$ mm и $t_{Me} = 0.15$ mm. На рис. 7 представлена частотная зависимость модуля MEVC структуры PZT/Ni/Metglas с геометрическими параметрами, приведенными выше.

Как видно из рис. 5 и 6, структуры с различным чередованием слоев с положительной и отрицательной магнитоэлектрической имеют противоположные знаки MEVC. Это происходит вследствие того, что в случае, когда нейтральная линия лежит вблизи границы раздела магнитоэлектрических слоев с положительной и отрицательной магнитоэлектрической, то пьезоэлектрический слой испытывает деформации, имеющие такой же знак, как и ближайший к нему магнитоэлектрический слой. Если ближайший слой обладает положительной магнитоэлектрической, то это растяжение и MEVC имеет

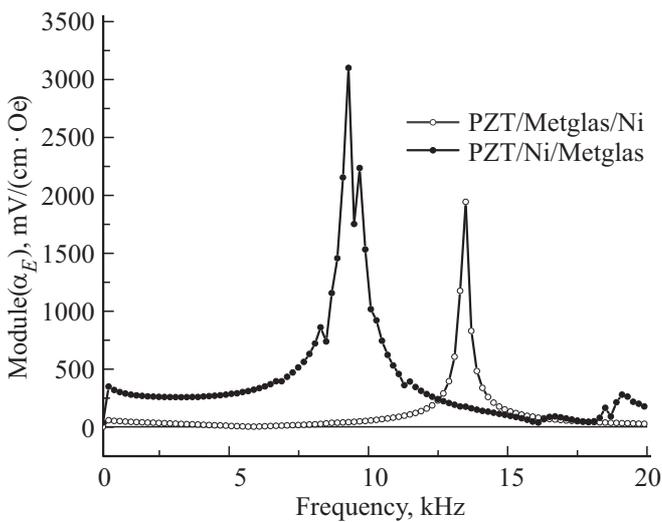


Рис. 7. Экспериментальная частотная зависимость модуля MEVC в структуре PZT/Ni/Metglas и PZT/Metglas/Ni.

отрицательный знак, вследствие отрицательного значения пьезоэлектрического коэффициента. При другом чередовании слоев, когда ближайшим к пьезоэлектрику слоем является никель, обладающий отрицательной магнитострикцией, пьезоэлектрик испытывает сжатие и MEVC имеет положительный знак.

Значение MEVC в структуре PZT/Terfenol-D/Ni почти в два раза меньше, чем в структуре PZT/Metglas/Ni, хотя структуры имеют одинаковые значения геометрических параметров и примерно одинаковые значения пьезомагнитного коэффициента, который при расчетах принимался равным $q_{Te} = q_{Me} = 0.3 \text{ ppm/Oe}$. Это связано с тем, что величина MEVC пропорциональна не просто пьезомагнитному коэффициенту, а его произведению на модуль Юнга. Поскольку модуль Юнга Terfenol-D почти в два раза меньше модуля Юнга Metglas, что и приводит к такому различию.

Резонансные частоты структур PZT/Terfenol-D/Ni и PZT/Metglas/Ni больше резонансных частот структур с другим чередованием слоев PZT/Ni/Terfenol-D и PZT/Ni/Metglas. Это объясняется тем, что резонансная частота, согласно выражению (24) пропорциональна \sqrt{D} , где D — жесткость при изгибе, которая равна сумме произведений модулей Юнга на осевые моменты инерции относительно нейтральной оси соответствующих слоев. Поскольку модуль Юнга никеля больше модулей Юнга Metgласа и Terfenol-D, то жесткость структур PZT/Terfenol-D/Ni и PZT/Metglas/Ni больше жесткости структур с противоположным чередованием магнитострикционных слоев, что приводит к увеличению резонансных частот. Этот факт подтверждается экспериментально на рис. 7, из которого следует, что резонансная частота структуры PZT/Metglas/Ni больше резонансной частоты структуры PZT/Ni/Metglas. Значение модуля MEVC структуры PZT/Ni/Metglas больше

модуля MEVC структуры с противоположным значением слоев. Это связано с тем, что Metglas обладает большим значением пьезомагнитного модуля, чем Ni, и в структуре PZT/Ni/Metglas он расположен дальше от нейтральной линии, вследствие чего результирующей изгибающий момент, определяемый выражением (19) для структуры PZT/Ni/Metglas больше, чем для структуры PZT/Metglas/Ni, что приводит к большему значению MEVC.

4. Заключение

Трехслойные асимметричные структуры, содержащие пьезоэлектрический слой и два магнитострикционных слоя с положительной и отрицательной магнитострикцией, показывают более сильную МЭ-связь, чем аналогичные двухслойные структуры. Значение MEVC зависят не только от физических и геометрических параметров слоев, но также и от чередования магнитострикционных слоев. При неизменных значениях параметров слоев максимальная величина эффекта достигается, когда нейтральная линия расположена на границе раздела между слоями с положительной и отрицательной магнитострикцией, при этом середина слоя, обладающего максимальным значением пьезомагнитного коэффициента, должна быть наиболее удалена от нейтральной линии. Слои с различным чередованием магнитострикционных слоев обладают противоположными знаками MEVC, что приводит к тому, что колебания возникающего электрического поля в них совершаются в противофазе.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке: в Новгородском университете грантом РФФИ — БРФФИ № 18-52-00021, в Institute of Mechanics of the NAS of Armenia при финансовой поддержке Государственного комитета по науке МОН РА в рамках научного проекта № 18Т-2С195, в Oakland University грантами NSF № ECCS-1307714 и № DMR-1808892, Ying Liu посредством Chinese Scholarship Council, в Hubei University грантами NSFC № 51372074 и № 51472078.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.А. Бухараев, А.К. Звездин, А.П. Пятаков, Ю.К. Фетисов. УФН **188**, 1288 (2018).
- [2] А.П. Пятаков, А.К.Звездин. УФН **182**, 593 (2012).
- [3] N.A. Spaldin, R. Ramesh. Nature Mater. **18**, 203 (2019).
- [4] A.V. Sadovnikov, A.A. Grachev, E.N. Beginin, S.E. Sheshukova, Yu.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov. Phys. Rev. Appl. **7**, 014013 (2017).

- [5] C. Song, B. Cui, F. Li, X. Zhou, F. Pan. *Prog. Mater. Sci.* **87**, 33 (2017).
- [6] J.G. Wan, J.-M. Liu, H.L.W. Chand, C.L. Choy, G.H. Wang, C.W. Nan. *J. Appl. Phys.* **93**, 9916 (2003).
- [7] Д.А. Филиппов. Письма в ЖТФ **30**, 6 (2004).
- [8] G. Srinivasan, E.T. Rasmussen, J. Gallegos, R. Srinivasan, Yu.I. Bokhan, V.M. Laletin. *Phys. Rev. B* **64**, 214408 (2001).
- [9] Y.-Y. Guo, J.-P. Zhou, P. Liu. *Curr. Appl. Phys.* **10**, 1092 (2010).
- [10] Д.Ю. Карпенков, А.А. Богомолов, А.В. Солнышкин, В.А. Головин, А.Ю. Карпенков, Ю.Г. Пастушенков. *Неорганические материалы* **47**, 1396 (2011).
- [11] D.A. Pan, Y. Bai, W. Y. Chu, L.J. Qiao. *J. Phys D* **41**, 022002 (2008).
- [12] А.В. Калгин, С.А. Гриднев, Z.H. Gribе. *ФТТ* **56**, 2111 (2014).
- [13] G. Sreenivasulu, V.M. Petrov, L.Y. Fetisov, Y.K., G. Srinivasan. *Phys. Rev. B* **86**, 214405 (2012).
- [14] Д.А. Филиппов, В.М. Лалетин, Т.А. Galichyan. *ФТТ* **55**, 1728 (2013).
- [15] M.C. Lu, L. Mei, D.Y. Jeong, J. Xiang, H. Xie, Q.M. Zhang. *Appl. Phys. Lett.* **106**, 112905 (2015).
- [16] Peng Zhou, Amit V. Singh, Z. Li, M.A. Popov, Ying Liu, D.A. Filippov, Tianjin Zhang, Wei Zhang, P.J. Shah, B.M. Howe, M.E. McConney, G. Srinivasan, M.R. Page, A. Gupta. *Phys. Rev. Appl.* **11**, 054045 (2019).
- [17] V.M. Petrov, G. Srinivasan, M.I. Bichurin, T.A. Galkina. *J. Appl. Phys.* **105**, 063911 (2009).
- [18] G. Sreenivasulu, P. Qu, V. M. Petrov, Hongwei Qu, G. Srinivasan. *J. Appl. Phys.* **117**, 174105 (2015).
- [19] Н.С. Перов, Л.Ю. Фетисов, Ю.К. Фетисов. Письма в ЖТФ **37**, 1, (2011).
- [20] L.Y. Fetisov, N.S. Perov, Y.K. Fetisov, G. Srinivasan, V.M. Petrov. *J. Appl. Phys.* **109**, 053908 (2011).
- [21] А.В. Дарков, Г.С. Шпиро. *Сопротивление материалов* Изд. 4-е. М., Высш. шк. (1975). 654 с.
- [22] S.P. Timoshenko, D.H. Young. *Vibration Problems in Engineering*, 3rd ed. Van Nostrand, N. Y. (1955). 468 p.

Редактор К.В. Емцев