

05

Гигантский магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах в области электромеханического резонанса

© Д.А. Филиппов, М.И. Бичурин, В.М. Петров, В.М. Лалетин,
Н.Н. Поддубная, G. Srinivasan

Новгородский государственный университет, Великий Новгород, Россия

E-mail: fdma@novsu.ac.ru

Институт технической акустики, Витебск, Беларусь

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

Поступило в Редакцию 31 июня 2003 г.

Теоретически и экспериментально исследован магнитоэлектрический эффект в многослойных композиционных материалах на основе феррит-пьезоэлектриков. Используя метод эффективных параметров, получено выражение для магнитоэлектрического коэффициента и проанализирована его частотная зависимость. Показано, что в области электромеханического резонанса величина эффекта более чем на порядок превышает его низкочастотное значение. Результаты расчета для композита на основе никелевой феррошпинели — ЦТС удовлетворительно согласуются с экспериментальными значениями.

Композиционные магнитоэлектрические материалы представляют собой изготовленные по керамической технологии механические смеси магнитной и пьезоэлектрической компонент. В таких материалах могут наблюдаться эффекты, отсутствующие в каждой из компонент по отдельности. В частности, в таких материалах наблюдается магнитоэлектрический эффект, который заключается в возникновении поляризации под действием магнитного поля, и, наоборот, в возникновении намагниченности под действием электрического поля (МЕ-эффект). Наличие этого эффекта в композиционных материалах обусловлено механическим взаимодействием ферритовой и пьезоэлектрической подсистем. В магнитном поле вследствие магнитострикции в ферритовой компоненте возникают механические напряжения, которые передаются в пьезоэлектрическую фазу и благодаря пьезоэффекту вызывают поляризацию. Поскольку возникновение поляризации в магнитном поле в

композиционных материалах связано с возникновением механических напряжений, то следует ожидать, что в области электромеханического резонанса величина этого эффекта будет значительно больше [1,2].

Впервые о наблюдении магнитоэлектрического эффекта в объемных композиционных материалах в области электромеханического резонанса было сообщено в [3]. Однако в этой работе электромеханический резонанс использовался как метод выделения полезного сигнала на фоне помех и не было проведено детального исследования этого эффекта. В данной работе представлено как теоретическое, так и экспериментальное исследование магнитоэлектрического эффекта в области электромеханического резонанса в многослойных композиционных материалах. С макроскопической точки зрения композиционные материалы можно характеризовать некоторыми эффективными параметрами, такими как эффективные модули упругости (податливости), эффективные коэффициенты пьезоэффекта и магнитострикции. Очевидно что эти эффективные параметры будут определяться параметрами ферритовой и пьезоэлектрической компонент, степенью связности, а также будут зависеть от их удельных концентраций в композиционном материале [4]. Эти эффективные параметры можно использовать тогда, когда характерные масштабы изменения внешних воздействий много больше размеров структурных единиц. Для слоистых материалов таким параметром является толщина слоев ферритовой и пьезоэлектрической компонент. Поскольку для слоистых композиционных материалов ее типичный размер порядка $10 \mu\text{m}$, то эти эффективные параметры можно использовать для описания распространения упругих взаимодействий, вплоть до частот порядка сотен мегагерц.

В качестве модели рассмотрим образец из композиционного феррит-пьезоэлектрического материала в форме тонкой пластинки толщиной d , шириной b и длиной L , на нижней и верхней поверхности которой нанесены тонкие металлические контакты. Пусть образец поляризован по нормали к плоскостям контактов (ось Z). Магнитные поля, постоянное подмагничивающее и переменное с частотой ω , могут быть направлены или вдоль той же оси (продольная ориентация полей) или перпендикулярно к направлению поляризации, вдоль оси X (поперечная ориентация полей). В соответствии с этим будем различать продольный и поперечный МЕ-эффекты. Переменное магнитное поле вследствие магнитострикции вызывает колебания, которые распространяются как по толщине образца, так и в плоскости пластинки. В дальнейшем

будем интересоваться наиболее низкочастотными из этих колебаний, т.е. объемными колебаниями, распространяющимися вдоль пластинки. Будем считать, что толщина и ширина пластинки много меньше ее длины, т.е. $d \ll L$ и $b < L$. Поскольку грани пластинки свободные, то напряжения на ее поверхностях равны нулю. Так как пластинка тонкая и узкая, то можно считать, что компоненты напряжений T_2 и T_3 равны нулю не только на поверхностях, но и во всем объеме, и отличной от нуля компонентой тензора напряжений будет только T_1 . Кроме того, так как верхняя и нижняя грани пластинки представляют собой эквипотенциальные поверхности, то отличной от нуля компонентой вектора напряженности электрического поля будет только E_z . Интересующие нас уравнения для тензора деформаций S_i и индукции электрического поля D_i при продольной ориентации полей имеют вид

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

$$D_3 = \varepsilon_{33}E_3 + d_{31}T_1 + \alpha_{33}H_3, \quad (2)$$

где s_{11} — компоненты тензора податливости, ε_{33} , α_{33} — компоненты тензора диэлектрической проницаемости и магнитоэлектрической восприимчивости, d_{31} , q_{33} , — пьезоэлектрический и пьезомагнитный коэффициенты.

Для поперечной ориентации полей уравнения запишутся в виде

$$S_1 = s_{11}T_1 + d_{31}E_3 + q_{11}H_1, \quad (3)$$

$$D_3 = \varepsilon_{33}E_3 + d_{31}T_1 + \alpha_{31}H_1. \quad (4)$$

Выражая компоненты напряжений через компоненты деформаций и подставляя в уравнение движения среды, получим дифференциальное уравнение для x -проекции вектора смещения среды u_x , решение которого, с учетом того что грани пластинки свободные, имеет вид

$$u_x(x) = \frac{1}{k} \left(\left(\frac{\cos(kL) - 1}{\sin(kL)} \right) \cos(kx) + \sin(kx) \right) (d_{31}E_3 + q_{31}H_3), \quad (5)$$

где параметр $k = \omega(\rho s_{11})^{1/2}$, ρ — эффективная плотность композита.

При поперечной ориентации полей в выражении для u_x , вместо q_{31} будет стоять q_{11} .

Возникающую вследствие пьезоэффекта напряженность электрического поля найдем из уравнений (2) при продольной и из (4) при поперечной ориентации полей, используя при этом условие разомкнутой цепи. Выражая из (1) и (3) компоненты тензора напряжений через тензоры деформаций, с учетом решения для u_x и подставляя в (2) и (4) соответственно, получим выражение для E_z . Используя определение магнитоэлектрического коэффициента как $E_3 = \alpha_{E,L}H_3$ при продольной и $E_3 = \alpha_{E,T}H_1$ при поперечной ориентации, получим для них выражения

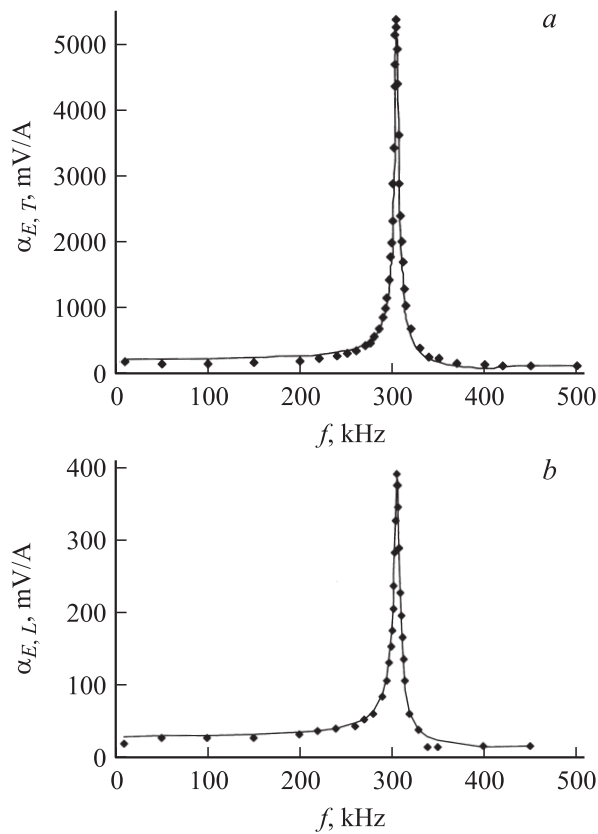
$$\alpha_{E,L} = \frac{1}{\Delta_a} \cdot \left(\frac{d_{31}q_{31}}{\epsilon_{33}s_{11}} (1 + \operatorname{tg}(\kappa)/\kappa) - \frac{\alpha_{33}}{\epsilon_{33}} \right), \quad (6)$$

$$\alpha_{E,T} = \frac{1}{\Delta_a} \cdot \left(\frac{d_{31}q_{11}}{\epsilon_{33}s_{11}} (1 + \operatorname{tg}(\kappa)/\kappa) - \frac{\alpha_{31}}{\epsilon_{33}} \right); \quad (7)$$

здесь введены обозначения $\kappa = kL/2$ — безразмерная переменная, $K_{31}^2 = d_{31}^2/(\epsilon_{33}s_{11})$ — квадрат коэффициента электромеханической связи при планарных колебаниях, $\Delta_a = 1 - K_{31}^2(1 + \operatorname{tg}(\kappa)/\kappa)$.

Из (6) и (7) видно, что при так называемой частоте антирезонанса, когда $\Delta_a = 0$, магнитоэлектрический коэффициент резко возрастает. Реально в таких структурах присутствуют потери, в основном обусловленные потерями в контактах, и в выражение для Δ_a надо добавить член $i\Gamma$, характеризующий затухание. Частота антирезонанса определяется эффективными параметрами материала и геометрическими размерами образца, в первую очередь, длиной пластинки, эффективным значением коэффициента податливости s_{11} и плотностью материала. Оценка показывает, что для образцов на основе феррошпинели-ЦТС в форме пластинки длиной порядка сантиметра резонансная частота находится в области 300 kHz.

Экспериментальные исследования эффекта проводились для образцов многослойного композиционного материала, состоящего из 11 слоев никелевой феррошпинели по $13 \mu\text{m}$ каждый и 10 слоев пьезокерамики ЦТС по $26 \mu\text{m}$ каждый. Образцы имели прямоугольную форму длиной 7.3 mm и шириной 2.15 mm. Вначале исследовалась зависимость низкочастотного МЕ-эффекта от напряженности постоянного магнитного поля. Затем при напряженности поля подмагничивания, соответствующей максимуму эффекта, снималась частотная зависимость величины магнитоэлектрического коэффициента в области



Частотная зависимость магнитоэлектрического коэффициента: *a* — при поперечной ориентации полей, *b* — при продольной ориентации полей (сплошная линия — теория, \blacklozenge — эксперимент).

электромеханического резонанса для продольной и поперечной ориентации электрического и магнитного полей. Результаты эксперимента и теоретические зависимости, рассчитанные по формулам (6) и (7), приведены на рисунке, *a, b* соответственно. При расчетах использовались следующие значения параметров: для никелевой шпинели — $s_{11} = 6.5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, $q_{31} = 125 \cdot 10^{-12} \text{ m/A}$, $q_{11} = -680 \cdot 10^{-12} \text{ m/A}$, $\epsilon_{33}/\epsilon_0 = 10$; для ЦТС — $s_{11} = 15.3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, $d_{31} = -175 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$,

$\epsilon_{33}/\epsilon_0 = 1750$. Эффективные параметры композита рассчитывались по методике [4], а параметр затухания определялся из ширины линии электромеханического резонанса, значение которого при расчетах принималось равным $\Gamma = 0.2$. Как следует из графиков, наблюдается очень хорошее соответствие между теоретической зависимостью и экспериментальными результатами. На частоте около 300 кГц наблюдается резонансное увеличение величины эффекта. Максимальное значение магнитоэлектрического коэффициента наблюдается при поперечной ориентации полей и составляет величину 5200 мВ/А, в то время как его значение на частоте 100 Нз составляет 180 мВ/А. Таким образом, резонансное значение магнитоэлектрического коэффициента почти в 30 раз превосходит его низкочастотную величину. При продольной ориентации полей величина эффекта на порядок меньше. Это обусловлено тем, что при продольной ориентации полей на величину эффекта значительное влияние оказывают размагничивающие поля.

Таким образом, можно считать, что величина магнитоэлектрического эффекта в области электромеханического резонанса более чем на порядок превосходит его низкочастотное значение и значение магнитоэлектрического коэффициента для многослойного композита на основе феррит-никелевой шпинели-ЦТС достигает величины более чем 5 В/А. Это позволяет надеяться на возможное практическое использование этого эффекта, которое до сих пор сдерживалось малым значением магнитоэлектрического коэффициента.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Министерства образования РФ (Е02–3.4–278), программы Университеты России (проект УР 01.01.007) и National Science Foundation (DMR–0322254).

Список литературы

- [1] Бичурин М.И., Филиппов Д.А., Петров В.М., Srinivasan G. // Физика электронных материалов. Материалы Международной конференции. 1–4 октября 2002 г. Калуга, Россия. С. 309.
- [2] Filippov D.A., Bichurin M.I., Petrov V.M., Srinivasan G. // Bull. American Phys. Soc. 2003. V. 48. P. 214.
- [3] Van Run A.M.J.G., Terrell D.R., Scholing J.H. // J. Mat. Sci. 1974. V. 9. P. 1710–1714.
- [4] Bichurin M.I., Petrov V.M., Srinivasan G. // J. Appl. Phys. 2002. V. 92. P. 7681–7683.