

В.М.Петров

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ МНОГОСЛОЙНОГО ФЕРРИТ-ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА

A theoretical model is presented for low frequency magnetoelectric (ME) effects in multilayers of magnetostrictive and piezoelectric phases. A method is proposed to take into account the finite conductivity of layers. The expressions for static and high-frequency ME susceptibility are obtained. The cases of longitudinal and transverse orientations of magnetic and electric fields are considered. The model predicts static ME susceptibility in nickel ferrite and lead zirconate titanate composites exceeding the high-frequency value by two orders of magnitude. The estimated ME susceptibility are in agreement with experimental data.

Композиционные двухфазные материалы на основе ферритов и пьезоэлектриков могут проявлять свойства, отсутствующие в исходных компонентах. В этих материалах, в частности, наблюдается магнитоэлектрический (МЭ) эффект, обусловленный взаимодействием магнитной и электрической подсистем через упругие деформации [1, 2]. Во внешнем магнитном поле магнитострикция магнитной фазы приводит к индуцированной поляризации благодаря пьезоэлектрическому эффекту в пьезоэлектрической фазе. Во внешнем электрическом поле E_j благодаря пьезоэлектрическому эффекту возникает деформация, которая при наличии магнитострикции в магнитной фазе приводит к индуцированной магнитной индукции B_i . При этом $B_i = \alpha_{ij} E_j$, где α_{ij} — тензор МЭ восприимчивости. Внутренние электрические поля в компонентах зависят от соотношения диэлектрических проницаемостей и проводимостей компонент композиционного материала. Статические электрические поля в компонентах пропорциональны удельным электрическим сопротивлениям слоев, а электрические поля на высоких частотах определяются их диэлектрическими проницаемостями.

В данной статье рассматривается теоретическая модель многослойного феррит-пьезоэлектрического композиционного материала, учитывающая соотношение внутренних полей. Расчетная величина МЭ восприимчивости сравнивается с результатами расчета по известным моделям и экспериментальными данными для композиционного материала на основе феррита никеля и цирконата-титаната свинца (ЦТС).

1. Метод расчета

Для анализа МЭ свойств многослойного композиционного материала, состоящего из чередующихся слоев пьезоэлектрической и магнитострикционной фаз, используется модель, позволяющая получить точное решение для МЭ восприимчивости. Влияние внешних электрического и магнитного полей с частотой ω , величина которой много меньше частоты электромеханического резонанса, на деформацию пьезоэлектрической и магнитострикционной фаз может быть описано с помощью следующих уравнений:

$$\begin{aligned} {}^p S_i &= {}^p s_{ij} {}^p T_j + {}^p d_{ki} {}^p E_k; \\ {}^p D_k &= {}^p d_{ki} {}^p T_i + {}^p \varepsilon_{kn} {}^p E_n; \\ {}^m S_i &= {}^m s_{ij} {}^m T_j + {}^m q_{ki} {}^m H_k; \\ {}^m B_k &= {}^m q_{ki} {}^m T_i + {}^m \mu_{kn} {}^m H_n, \end{aligned} \quad (1)$$

где ${}^p S_i$ и ${}^p T_j$ — компоненты тензоров деформаций и напряжений пьезоэлектрической фазы; ${}^p E_k$ и ${}^p D_k$ — компоненты векторов напряженности электрического поля и электриче-

ского смещения; ${}^p s_{ij}$ — коэффициенты податливости пьезоэлектрической фазы; ${}^p d_{ki}$ — пьезоэлектрические модули; ${}^p \varepsilon_{kn}$ — тензор диэлектрической проницаемости; ${}^m S_i$ и ${}^m T_j$ — компоненты тензоров деформаций и напряжений магнитострикционной фазы; ${}^m H_k$ и ${}^m B_k$ — компоненты векторов напряженности магнитного поля и магнитной индукции; ${}^m s_{ij}$ — коэффициенты податливости магнитострикционной фазы; ${}^m q_{ki}$ — пьезомагнитные модули; ${}^m \mu_{kn}$ — тензор магнитной проницаемости.

Решение уравнений (1) с учетом граничных условий, описывающих механическое взаимодействие фаз, позволяет найти электрическое поле, возникающее в пьезоэлектрической фазе при воздействии внешнего магнитного поля на магнитострикционную фазу. Однако внутренние поля в компонентах композита могут значительно отличаться от внешних полей. В данной работе для расчетов используется метод эффективной среды, при этом мы исследуем поведение эффективных параметров двухфазных композиционных феррит-пьезоэлектрических материалов. Многослойная структура рассматривается как однородный материал, для которого справедливы соотношения

$$\begin{aligned} S_i &= s_{ij}T_j + d_{ki}E_k + q_{ki}H_k; \\ D_k &= d_{ki}T_i + \varepsilon_{kn}E_n + \alpha_{kn}H_n; \\ B_k &= q_{ki}T_i + \alpha_{kn}E_n + \mu_{kn}H_n, \end{aligned} \quad (2)$$

где S_i и T_j — средние по объему образца компоненты тензоров деформаций и напряжений; E_k , D_k , H_k и B_k — средние значения компонент векторов напряженности электрического поля, электрического смещения, напряженности магнитного поля и магнитной индукции; s_{ij} , d_{ki} и q_{ki} — эффективные коэффициенты податливости, пьезоэлектрические и пьезомагнитные модули; ε_{kn} , μ_{kn} и α_{kn} — эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости и МЭ восприимчивость. Совместное решение уравнений (1) — (2) позволяет найти эффективные параметры композита. Используется система координат, в которой плоскость (1,2) совпадает с основаниями образца. Образец поляризован постоянным электрическим полем в направлении 3.

Пусть к образцу прикладывается внешнее электрическое поле с такой частотой, что емкость пьезоэлектрического слоя не успевает зарядиться через сопротивление ферритового слоя в течение периода колебаний. При этом круговая частота электрического поля должна удовлетворять условию $\omega \gg (\gamma^3 \varepsilon_{33})^{1/3} ({}^p v / {}^m v)$, где γ — проводимость ферритовой фазы; ${}^p v$ и ${}^m v$ — объемы пьезоэлектрической и магнитострикционной фаз. Расчет МЭ восприимчивости для этого случая выполнен численно ранее (см.[3]). В данной работе приводятся аналитические выражения для МЭ восприимчивости.

Для получения решений уравнений (1) — (2) рассмотрим внутренние поля в образце композита. Электрические поля в ферритовой и пьезоэлектрической компонентах в этом случае связаны соотношениями

$$D_3 = {}^p D_3; E_3 = (1 - \nu) {}^p D_3 / \varepsilon_0 + {}^p E_3 \nu. \quad (3)$$

Для решения системы уравнений (1) — (2) использовались граничные условия

$$\begin{aligned} S_1 = {}^p S_1 = {}^m S_1; S_2 = {}^p S_2 = {}^m S_2; {}^p T_1 = -{}^m T_1 (1 - \nu) / \nu; {}^p T_2 = -{}^m T_2 (1 - \nu) / \nu; \\ {}^p T_3 = {}^m T_3 = T_3 = 0; S_3 = [{}^p S_3 + {}^m S_3 (1 - \nu)] / \nu, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\nu = {}^p v / ({}^p v + {}^m v)$ — объемная доля пьезоэлектрической компоненты.

В случае продольной ориентации постоянного и переменного магнитного полей по отношению к электрическому полю и направлению поляризации образца средние значения напряженности магнитного поля и магнитной индукции определяются равенствами

$$B_3 = {}^m B_3; H_3 = \nu {}^m B_3 / \mu_0 + {}^m H_3 (1 - \nu). \quad (5)$$

Полагая симметрию магнитоэлектрической фазы кубической, а пьезоэлектрической — ∞m , можно получить следующее выражение для МЭ восприимчивости на основе решения системы уравнений (1) — (2) с учетом (3) — (5):

$$\alpha_{33} = \frac{2 {}^m \varepsilon_{33} \mu_0 v (1-v) {}^m q_{31} {}^p d_{31}}{s_1 \mu_1 \varepsilon_1 - 2 v^2 {}^m q_{31}^2 \varepsilon_1 - 2 (1-v)^2 \mu_1 {}^p d_{31}^2}, \quad (6)$$

где $s_1 = (1-v)({}^p s_{12} + {}^p s_{11}) + v({}^m s_{12} + {}^m s_{11})$, $\varepsilon_1 = (1-v){}^p \varepsilon_{33} + v {}^m \varepsilon_{33}$, $\mu_1 = (1-v)\mu_0 + v {}^m \mu_{33}$.

В случае поперечной ориентации, когда постоянное и переменное магнитные поля лежат в плоскости слоев композита и перпендикулярны по отношению к электрическому полю и направлению поляризации образца, выражения для средних значений напряженности магнитного поля и магнитной индукции имеют вид

$$H_3 = {}^m H_3, B_3 = {}^m B_3 (1-v) + \mu_0 {}^m H_3 v. \quad (7)$$

В этом случае, решая (1) — (2) с учетом (3), (4) и (7), получим:

$$\alpha_{13} = \frac{{}^m \varepsilon_{33} v {}^p d_{31} (1-v) ({}^m q_{12} + {}^m q_{11})}{\varepsilon_1 s_1 - 2 {}^p d_{31}^2 (1-v)^2}. \quad (8)$$

2. Статическая магнитоэлектрическая восприимчивость

Будем считать, что проводимость пьезоэлектрического слоя мала по сравнению с проводимостью ферритового слоя. Пусть к образцу прикладывается внешнее электрическое поле с такой низкой частотой, что емкость пьезоэлектрического слоя успевает практически полностью зарядиться через сопротивление ферритового слоя в течение периода колебаний. При этом круговая частота электрического поля ω должна удовлетворять условию $\omega \ll ({}^m \gamma / \varepsilon_{33}) ({}^p v / {}^m v)$. В этом случае внутренние электрические поля в ферритовой и пьезоэлектрической компонентах связаны соотношением

$${}^m E_3 / {}^p E_3 = {}^p \gamma / {}^m \gamma. \quad (9)$$

Решение уравнений (1) — (2) с учетом (4), (5), (7) и (9) позволяет получить следующие выражения МЭ восприимчивости для продольной и поперечной ориентаций полей:

$$\alpha_{33} = \frac{2 {}^m \gamma \mu_0 v (1-v) {}^m q_{31} {}^p d_{31}}{[{}^p \gamma (1-v) + {}^m \gamma v] [s_1 \mu_1 - 2 v^2 {}^m q_{31}^2]},$$

$$\alpha_{13} = \frac{{}^m \gamma v (1-v) ({}^m q_{12} + {}^m q_{11}) {}^p d_{31}}{[{}^p \gamma (1-v) + {}^m \gamma v] s_1}.$$

В качестве примера рассмотрим композит, состоящий из поляризованной сегнетокерамики на основе ЦТС и никелевой феррошпинели. При этом используются следующие значения параметров для компонентов композита: ${}^p s_{11} = 15,3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$, ${}^p s_{12} = -5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$, ${}^p s_{13} = -7,22 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$, ${}^p s_{33} = 17,3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$, ${}^m s_{11} = 15,3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$, ${}^m s_{12} = -5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$, ${}^m q_{33} = -680 \cdot 10^{-12} \text{ м/А}$, ${}^m q_{31} = 125 \cdot 10^{-12} \text{ м/А}$, ${}^p d_{31} = -175 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}$, ${}^p d_{33} = -400 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}$, ${}^m \mu_{33} / \mu_0 = 2$, ${}^p \varepsilon_{33} / \varepsilon_0 = 1750$, ${}^m \varepsilon_{33} / \varepsilon_0 = 10$, ${}^m \gamma = 10^{-5} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$, ${}^p \gamma = 10^{-13} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$.

На рис.1 и 2 представлены зависимости высокочастотной и статической магнитоэлектрических восприимчивостей от объемной доли пьезоэлектрической компоненты для продольной и поперечной ориентации полей.

Из рисунков 1 и 2 видно, что статическая МЭ восприимчивость на два порядка превышает высокочастотную, при этом МЭ восприимчивость для поперечной ориентации полей более чем в пять раз выше, нежели для продольной ориентации. Это связано с влиянием эффекта размагничивания при направлении магнитного поля, перпендикулярном к плоскости образца, в результате чего внутреннее магнитное поле в магнитной компоненте уменьшается.

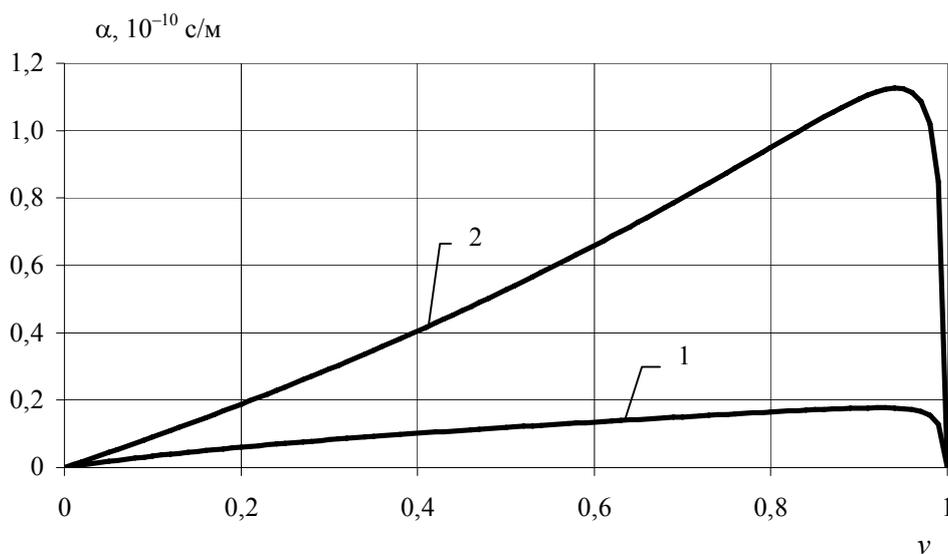


Рис.1. Зависимость высокочастотной магнитоэлектрической восприимчивости от объемной доли пьезоэлектрической фазы: 1 — продольная ориентация полей, 2 — поперечная ориентация полей

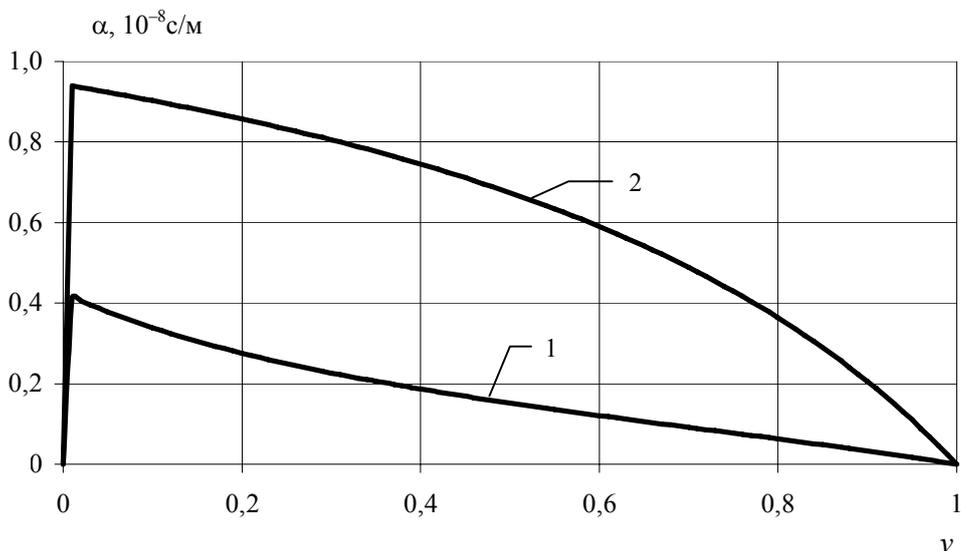


Рис.2. Зависимость статической магнитоэлектрической восприимчивости от объемной доли пьезоэлектрической фазы: 1 — продольная ориентация полей, 2 — поперечная ориентация полей

При ${}^p\gamma^m\gamma \ll v \ll 1$ статическая МЭ восприимчивость для поперечной ориентации полей приближается к предельно достижимому значению, равному $({}^m q_{12} + {}^m q_{11})^p d_{31} / ({}^p s_{11} + {}^p s_{12})$. Для композита рассматриваемого состава максимальное значение МЭ восприимчивости соответствует объемной доле пьезоэлектрической компоненты, равной $({}^p h / {}^m h)^{1/2} \approx 10^{-4}$ (${}^p h$ и ${}^m h$ — толщины пьезоэлектрической и ферритовой компонент), а предельно достижимое значение МЭ восприимчивости равно $0,94 \cdot 10^{-8}$ c/m. Столь высокое значение статической МЭ восприимчивости обусловлено большой величиной электрического поля в пьезоэлектрической компоненте при ее малой толщине и значительной проводимости ферритового слоя, а также большими внутренними механическими напряжениями ${}^p T_j$ и ${}^m T_j$ ($j = 1, 2$), индуг-

цируемыми электрическим полем в пьезоэлектрической компоненте. Максимальное значение МЭ восприимчивости рассматриваемого композита превосходит значение этого параметра для известных материалов.

Используя экспериментальные данные [1] по измерению МЭ коэффициента $\alpha_{E,T} = 0,11 \text{ В/А}$ для композиционного материала, состоящего из поляризованной сегнетокерамики ЦТС и никелевой феррошпинели при объемной доле пьезоэлектрика $v = 0,5$, можно найти высокочастотную МЭ восприимчивость $\alpha_{13} = \alpha_{E,T} \cdot \epsilon_{33} = 0,41 \cdot 10^{-10} \text{ с/м}$. Полученное значение МЭ восприимчивости удовлетворительно согласуется с расчетными данными (рис.1).

3. Выводы

Таким образом, рассмотренная модель позволяет получить зависимость статической и высокочастотной магнитоэлектрических восприимчивостей от параметра связи слоев, объемной доли и параметров компонентов композита. При этом статическая МЭ восприимчивость при малой толщине пьезоэлектрических слоев на два порядка превышает высокочастотную МЭ восприимчивость.

-
1. Bichurin M.I., Petrov V.M., Srinivasan G. // *Ferroelectrics*. 2002. V.280. P.165-175.
 2. Harshe G., Dougherty J.O., Newnham R.E. // *Int. J. Appl. Electromagn. Mater.* 1993. V.4. P.145-159.
 3. Петров В.М., Бичурин М.И., Татаренко А.С., Сринивасан Г. // *Вестник НовГУ. Сер.: Техн. науки*. 2003. № 23. С.20-23.