

05

Влияние электрического поля на сдвиг линии магнитного резонанса в феррит-пьезоэлектрических структурах

© О.В. Антоненков, М.И. Бичурин, Д.А. Филиппов,
В.М. Петров, G Srinivasan

Новгородский государственный университет, В. Новгород, Россия
E-mail: fdma@novsu.ac.ru
Physics Department, Oakland University Rochester, MI 48309, USA

Поступило в Редакцию 23 марта 2005 г.

Представлено теоретическое и экспериментальное исследование сдвига линии магнитного резонанса в композиционных феррит-пьезоэлектрических материалах. Получены выражения для сдвига резонансной линии под действием электрического поля, зависящие от параметров, характеризующих структуру. Показано, что сдвиг линии магнитного резонанса линеен по электрическому полю и возрастает при увеличении процентного содержания пьезоэлектрика в составе композита. Экспериментально исследована зависимость эффекта для образцов из феррит-литиевой шпинели — цирконата-титаната свинца.

Введение. Магнитоэлектрический (МЭ) эффект заключается в возникновении поляризации под действием магнитного поля, и наоборот, в возникновении намагниченности под действием электрического поля. В монокристаллических МЭ-материалах механизмом его возникновения в первую очередь является спин-орбитальное взаимодействие. Вклад остальных механизмов мал. В отличие от монокристаллов природа МЭ-эффекта в композиционных материалах обусловлена механическим взаимодействием ферритовой и пьезоэлектрической подсистем, входящих в состав композита. По отдельности эффекта нет ни в ферритовой, ни в пьезоэлектрической фазах. Поэтому МЭ-эффект в таких материалах относится к классу вторичных эффектов. Приложении электрического поля в пьезоэлектрической фазе возникают механические напряжения, которые передаются в магнитную компоненту, и за счет магнитострикции происходит изменение магнитного момента, в результате чего наблюдается сдвиг резонансной линии. Монокристаллические материалы характеризуются малыми значениями

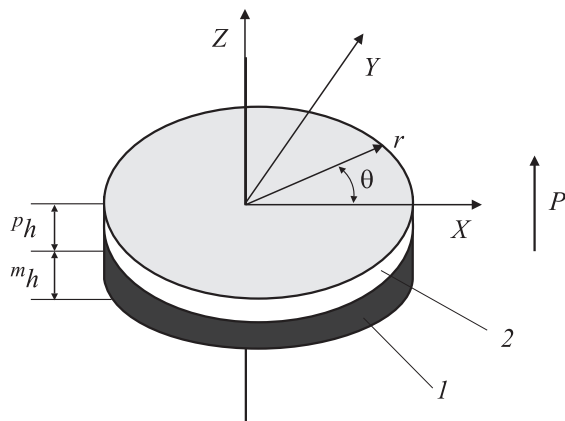


Рис. 1. Геометрия образца: 1 — ферромагнетик, 2 — пьезоэлектрик.

МЭ-коэффициентов, что затрудняет использование МЭ-эффекта в технике, поэтому представляется целесообразным поиск и исследование новых композиционных материалов на основе пьезоэлектрических и магнитострикционных материалов, в которых величина эффекта значительно выше.

Модель и основные уравнения. В качестве модели рассмотрен двухслойный феррит-пьезоэлектрический образец в форме диска радиусом R , состоящий из феррита с кубической ($m3m$) симметрией толщиной m_h и пьезоэлектрика толщиной p_h с симметрией ∞m относительно оси поляризации. Толщина диска мала по сравнению с его радиусом, т. е. $m_h, p_h \ll R$. На нижней и верхней поверхности образца нанесены тонкие металлические контакты, толщину которых считаем пренебрежимо малой (рис. 1). Пьезоэлектрик поляризован по нормали к плоскостям контактов (ось Z). Будем считать, что направление поляризации пьезоэлектрической фазы совпадает с осью $[111]$ магнитострикционной фазы. Постоянное и переменное магнитные поля совпадают с направлением поляризации. Предположим, что поверхности диска свободные, следовательно, нормальные составляющие тензора механических напряжений на них равны нулю. Для тонкого диска можно считать, что компонента тензора напряжений T_3 равна нулю не только на поверхности, но и во всем объеме. Верхняя и нижняя поверхности диска представляют собой эквипотенциальные поверхности, поэтому отличной от нуля

будет только z -проекция вектора напряженности электрического поля. С учетом этого уравнения для тензора деформаций магнитной и пьезоэлектрической фаз соответственно имеют вид

$$\begin{aligned} {}^m S_1 &= s_{11} {}^m T_1 + s_{12} {}^m T_2, \\ {}^m S_2 &= s_{12} {}^m T_1 + s_{22} {}^m T_2, \\ {}^p S_1 &= s_{11} {}^p T_1 + s_{12} {}^p T_2 + d_{31} E_3, \\ {}^p S_2 &= s_{12} {}^p T_1 + s_{22} {}^p T_2 + d_{31} E_3, \end{aligned} \quad (1)$$

где ${}^m s_{ij}$, ${}^p s_{ij}$ — модули податливости магнитной и пьезоэлектрической фаз соответственно, d_{ij} — пьезоэлектрические модули, E_3 — z -проекция вектора напряженности электрического поля.

Для дальнейших расчетов удобно воспользоваться симметрией задачи и перейти к цилиндрической системе координат с использованием известных преобразований [1]. После преобразований уравнение для радиальных смещений среды примет вид

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} = 0. \quad (2)$$

Общее решение уравнения (8) имеет вид

$$u_r = c_1 r + c_2 / r. \quad (3)$$

Постоянные интегрирования c_1 и c_2 определяются из следующих граничных условий: при $r = 0$ смещение ${}^m u(r) = {}^p u(r) = 0$. Из условия равновесия образца следует, что при $r = R$ ${}^m T_{rr} {}^m h + {}^p T_{rr} {}^p h = 0$. На границе раздела феррит-пьезоэлектрик имеем ${}^m S_{rr} = k {}^p S_{rr}$, где $k = 0 \div 1$ — коэффициент, учитывающий неидеальность контакта между фазами. Полученные значения постоянных интегрирования c_1 и c_2 подставляются в (3). Далее выражая компоненты тензора напряжений через компоненты тензора деформации, для компонент тензора напряжений были получены следующие выражения:

$$\begin{aligned} {}^m T_{rr} &= \frac{k}{{}^m s_{11}(1 - {}^m \nu) + k \eta {}^p s_{11}(1 - {}^p \nu)} d_{31} E_3, \\ {}^m T_{\theta\theta} &= \frac{k}{{}^m s_{11}(1 - {}^m \nu) + k \eta {}^p s_{11}(1 - {}^p \nu)} d_{31} E_3, \end{aligned} \quad (4)$$

где ${}^m \nu = -{}^m s_{12} / {}^m s_{11}$, ${}^p \nu = -{}^p s_{12} / {}^p s_{11}$ — коэффициенты Пуассона магнитной и пьезоэлектрической фаз соответственно, $\eta = {}^m h / {}^p h$ — отношение толщины ферромагнетика к толщине пьезоэлектрика.

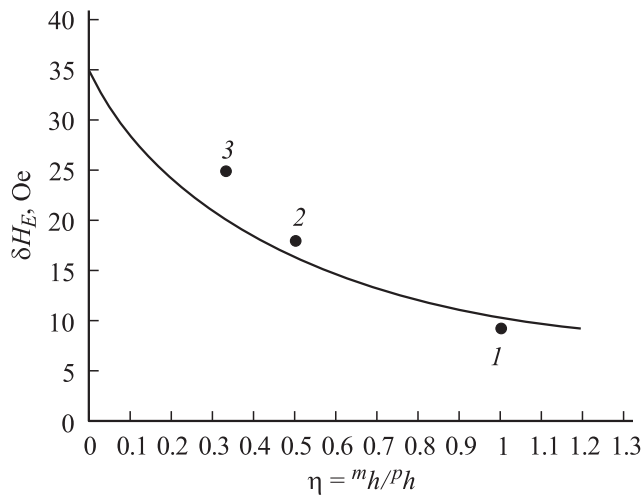


Рис. 2. Зависимость сдвига линии магнитного резонанса от толщины ЦТС-слоев для композита из 16 слоев $\text{Li}_{0.4}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_{2.4}\text{O}_4$ с постоянной толщиной слоев по $38 \mu\text{m}$ и 15 слоев ЦТС. Напряженность электрического поля 22 kV/cm . Сплошная линия — теория, точки — эксперимент.

Механические напряжения приводят к изменению намагниченности феррита, вследствие чего происходит сдвиг линии магнитного резонанса. Рассмотрим случай, когда магнитное поле H лежит в (111) плоскости образца и параллельно $[011]$. Тогда сдвиг линии магнитного резонанса при приложении электрического поля определяется выражением

$$\delta H_E = \frac{({}^m T_{rr} + {}^m T_{\theta\theta})\lambda_{100}}{4M_0} = \frac{1}{2M_0} \frac{k\lambda_{100}}{m_{s_{11}}(1 - m\nu) + k\eta^p s_{11}(1 - p\nu)} d_{31} E_3, \quad (5)$$

где M_0 — намагниченность насыщения, λ_{100} — константа магнито-стрикции.

Эксперимент. В эксперименте использовался резонансный метод исследования МЭ-эффекта. Измерения проводились на частоте 9.3 GHz на установке, включающей спектрометр с двойной магнитной модуляцией. Образец исследуемого материала опускался в центр резонатора. На электроды подавалось импульсное напряжение величиной до 5 kV в

форме прямоугольных импульсов. Исследования эффекта проводились на образцах из композиционного феррит-пьезоэлектрического материала с разным количеством и толщиной слоев, а также их составом. Использовались образцы в виде дисков диаметром 3–5 mm и толщиной 0.25–0.5 mm.

На рис. 2 приведены результаты эксперимента и теоретическая зависимость, рассчитанная по формуле (3), сдвига линии магнитного резонанса для многослойного композиционного материала из 16 слоев $\text{Li}_{0.4}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_{2.4}\text{O}_4$ по 38 μm и 15 слоев цирконата-титаната свинца (ЦТС) переменной толщины. При расчетах использовались следующие значения параметров [2]: для феррит-литиевой шпинели: $m_{s11} = 6.84 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, $m_{s12} = -2.46 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, $4\pi M_0 = 3600 \text{ G}$; для ЦТС: $p_{s11} = 15.3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, $p_{s12} = -5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, $p_{d31} = -175 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$; для $\text{Li}_{0.4}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_{2.4}\text{O}_4$ -ЦТС: $\lambda_{100} = 23 \cdot 10^{-6}$.

Как следует из выражения (5), сдвиг резонансной линии линейен по электрическому полю и увеличивается при увеличении процентного содержания пьезоэлектрика в составе композита (при уменьшении значения $\eta = m_{s11}/p_{s11}$). Полученные результаты позволяют сделать вывод, что для получения максимального МЭ-эффекта необходимо использовать пьезоэлектрическую компоненту с большим пьезоэлектрическим коэффициентом, а магнитострикционную компоненту с малой намагниченностью насыщения и высокой магнитострикцией.

Список литературы

- [1] Mazon W.P. // Phys. Rev. 1948. V. 74. N 9. P. 1134–1147.
- [2] Bichurin M.I., Petrov V.M., Kiliba Yu.V. et al. // Phys. Rev. B. 2002. V. 66. P. 134404-1–134404-10.