

Магнитоэлектрический эффект в феррит-пьезоэлектрических композитах в области магнитоакустического резонанса

М.И. Бичурин¹, В.М. Петров¹, О.В. Рябков¹, G. Srinivasan², С.-W. Nan³

¹Новгородский государственный университет, Великий Новгород, 173003

²Oakland University, Rochester, Michigan 48309, USA

³Tsinghua University, Beijing 100084, China

В слоистых структурах на основе монокристаллов ферритов и пьезоэлектриков хорошего качества степень магнитного упорядочения может быть достаточно высока, и в материалах такого типа возможно наблюдение эффектов, связанных с магнитоупругим взаимодействием. К динамическим эффектам, рассматриваемым в данной работе, относится магнитоэлектрический (МЭ) эффект, заключающийся в индуцировании электрического поля во внешнем магнитном поле. В области наложения частот электромеханического и магнитного резонансов можно ожидать значительное усиление этого эффекта. В данной работе рассматривается МЭ эффект в слоистой (на основе монокристаллов) структуре феррит никеля – цирконат-титанат свинца в области магнитоакустического резонанса.

Для теоретического анализа распространения магнитоупругих волн использован феноменологический подход, поскольку он позволяет получить практически все основные результаты.



Рис. 1 Двухслойная феррит-пьезоэлектрическая структура. \mathbf{P} – вектор поляризации пьезоэлектрика, \mathbf{H}_0 – подмагничивающее поле. Переменное поле \mathbf{H} направлено перпендикулярно плоскости рисунка

Рассмотрим двухслойную феррит-пьезоэлектрическую структуру в форме пластинки. Будем считать, что постоянное магнитное поле \mathbf{H}_0 параллельно плоскости пластинки, а переменное магнитное поле также параллельно этой плоскости и

перпендикулярно \mathbf{H}_0 . Вектор поляризации пьезоэлектрического слоя направлен перпендикулярно плоскости пластинки. Предполагается, что ферритовая компонента композита находится в насыщенном (однодоменном) состоянии. Это состояние имеет два важных преимущества. Во-первых, когда имеются домены, акустические потери на высоких частотах слишком велики. Во-вторых, большая восприимчивость при низких частотах в результате процесса релаксации уменьшается при повышении частоты, и в насыщенных образцах ферромагнитный резонанс становится единственным путем получения больших эффективных восприимчивостей. Плотность свободной энергии монокристаллической ферритовой фазы мы представили в виде

$${}^m W = W_H + W_{an} + W_{ma} + W_{ac} + W_{af},$$

где W_H – энергия Зеемана,

W_{an} – энергия кубической кристаллографической анизотропии,

W_{ma} – магнитоупругая энергия,

W_{ac} – упругая энергия,

W_{af} – энергия анизотропии формы.

Уравнения движения ферритовой и пьезоэлектрической фаз композита могут быть записаны так:

$$\partial^2({}^m u_1)/\partial t^2 = \partial^2({}^m W)/(\partial x \partial^m S_1) + \partial^2({}^m W)/(\partial y \partial^m S_6) + \partial^2({}^m W)/(\partial z \partial^m S_5),$$

$$\partial^2({}^p u_1)/\partial t^2 = \partial({}^m T_1)/\partial x + \partial({}^m T_1)/\partial y + \partial({}^m T_1)/\partial z,$$

$$\partial^2({}^p u_2)/\partial t^2 = \partial({}^m T_2)/\partial x + \partial({}^m T_2)/\partial y + \partial({}^m T_2)/\partial z.$$

где ${}^m u_i$, ${}^p u_i$ – смещения, ${}^m S_i$ – деформации, ${}^m T_i$ – механические напряжения.

Верхний индекс p соответствует пьезоэлектрической фазе, m – ферритовой.

Уравнения движения вектора намагниченности имеет вид

$$\partial \mathbf{M}/\partial t = -\gamma [\mathbf{M}, \mathbf{H}_{\text{eff}}],$$

$$\text{где } \mathbf{H}_{\text{eff}} = -\partial({}^m W)/\partial \mathbf{M},$$

где \mathbf{M} – намагниченность ферритовой фазы, \mathbf{H}_{eff} – эффективное поле,

Индукцированное в пьезоэлектрической компоненте электрическое поле определяется из условия разомкнутой цепи, т. е. равенства нулю среднего значения электрической индукции в пьезоэлектрическом слое:

$$D = \frac{1}{pL} \int_{-pL}^0 D dz = 0,$$

где под знаком интеграла стоит электрическая индукция в пьезоэлектрическом слое, а pL – толщина пьезоэлектрического слоя. Электрическая индукция в пьезоэлектрическом слое

может быть найдена путем совместного решения уравнений движения среды, а также уравнения движения вектора намагниченности ферритовой фазы с учетом граничных условий.

В работе получены следующие основные результаты.

1. Проведен теоретический анализ МЭ эффекта в слоистой феррит-пьезоэлектрической структуре в области магнитоакустического резонанса.
2. Обнаружена резонансная зависимость МЭ коэффициента по напряжению композиционных феррит-пьезоэлектрических материалов в области магнитоакустического резонанса при совпадении частот электромеханического резонанса и однородной прецессии намагниченности ферритовой фазы.
3. Расчетное значение МЭ коэффициента по напряжению для композита на основе феррита никеля и цирконата-титаната свинца в области магнитоакустического резонанса составляет 200 В/А.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании устройств твердотельной электроники, работа которых основана на генерации поверхностных акустических волн или на управлении параметрами магнитного резонанса с помощью электрического поля.