

## МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ФЕРРИТ-ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ

**Петров В.М., Бичурин М.И., Петров Р.В.**

*ФГБОУ ВПО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», Великий Новгород, Россия (173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41), e-mail: Mirza.Bichurin@novsu.ru*

Рассмотрен магнитоэлектрический эффект в двухслойной магнитострикционно-пьезоэлектрической пленочной структуре на диэлектрической подложке в области магнитоакустического резонанса. Проведено моделирование магнитоэлектрического взаимодействия в пленочной феррит-пьезоэлектрической структуре на диэлектрической подложке, подмагниченной внешним магнитным полем вдоль оси [100] ферритового кристалла с кубической симметрией. Получено выражение для магнитоэлектрического коэффициента по напряжению с учетом эффекта зажатия со стороны подложки. Получена теоретическая оценка для пленочной структуры титанат бария – железиттриевый гранат на подложке из галлий-гадолиниевого граната. Расчетное значение магнитоэлектрического коэффициента по напряжению позволяет рекомендовать слоистые композиционные материалы на основе монокристаллических ферритов и пьезоэлектриков для использования в радиокомпонентах, работа которых основана на генерации магнитоупругих волн или на управлении параметрами магнитного резонанса с помощью электрического поля.

**Ключевые слова:** магнитоэлектрический эффект, магнитострикционно-пьезоэлектрическая структура, магнитоакустический резонанс, эффект зажатия.

## MAGNETOACOUSTIC RESONANCE IN FERRITE-PIEZOELECTRIC FILM STRUCTURES

**Petrov V.M., Bichurin M.I., Petrov R.V.**

*Novgorod State University, Velikiy Novgorod, Russia (173003, Velikiy Novgorod, Bolshaiya St.-Peterburgskaiya, d. 41), e-mail: Mirza.Bichurin@novsu.ru*

Magnetolectric behaviour of a magnetostrictive-piezoelectric film on a substrate is discussed in this article in respect to magnetoacoustic resonance region. It is discussed modeling of magnetolectric interaction in the film of ferrite-piezoelectric structure on the dielectric substrate biased by external magnetic field along the [100] axis of ferrite crystal with cubic symmetry. The expression for magnetolectric voltage coefficient is obtained taking into account the clamping effect produced by substrate. Theoretical estimates are obtained for the bilayer of yttrium-iron garnet and barium titanate on gadolinium gallium garnet substrate. The calculated value of magnetolectric voltage coefficient lets to recommend the layered composite materials on the basis of single crystal ferrites and piezoelectrics for use in radio-components, whose work is based on the generation of magnetoelastic waves or of the control of magnetic resonance parameters by the electric field.

**Keywords:** magnetolectric effect, magnetostrictive-piezoelectric structure, magnetoacoustic resonance, clamping effect.

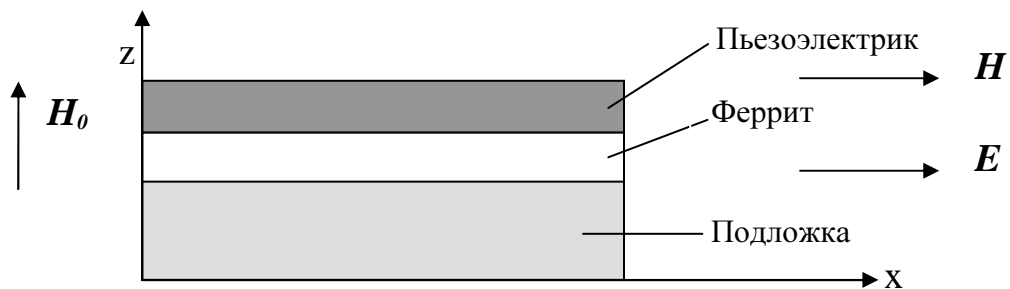
### Введение

Наличие магнитоэлектрических (МЭ) свойств в слоистых феррит-пьезоэлектрических композитах обусловлено механическим взаимодействием между

магнитной и электрической подсистемами [1,3,6]. Магнитострикция феррита во внешнем магнитном поле вызывает поляризацию электрической подсистемы посредством пьезоэлектрического эффекта. В работах [2,4,5] показано, что при соответствующих значениях параметров компонент имеет место гигантское увеличение МЭ-коэффициента по напряжению в области совпадения частот электромеханического резонанса (ЭМР) и однородной прецессии намагниченности, т.е. в области магнитоакустического резонанса. В указанных работах проведен численный расчет МЭ-коэффициента по напряжению в двухслойной структуре, намагниченной касательно и перпендикулярно ее плоскости. Целью данной работы является нахождение явного выражения для МЭ-коэффициента по напряжению и исследование его зависимости от частоты и величины внешнего магнитного поля с учетом эффекта зажатия со стороны подложки.

### Моделирование

В работе проводится моделирование МЭ-взаимодействия в пленочной феррит-пьезоэлектрической структуре на диэлектрической подложке, подмагниченной внешним магнитным полем вдоль оси [100] ферритового кристалла с кубической симметрией (рис. 1). Пьезоэлектрическая компонента полагается поляризованной перпендикулярно плоскости образца, при этом направление поляризации параллельно подмагничивающему полю  $H_0$ . В качестве исходных используются уравнения движения намагниченности, уравнения движения ферритовой и пьезоэлектрической фаз, а также материальные соотношения для пьезоэлектрической фазы.



**Рисунок 1. Образец феррит-пьезоэлектрической структуры на подложке.**

Система уравнений движения для магнитной и пьезоэлектрической фаз и подложки имеет вид:

$$\begin{aligned}
 {}^m\rho \partial^2({}^m u_1)/\partial t^2 &= \partial^2({}^m W)/(\partial x \partial^m S_1) + \partial^2({}^m W)/(\partial y \partial^m S_6) + \partial^2({}^m W)/(\partial z \partial^m S_5), \\
 {}^m\rho \partial^2({}^m u_2)/\partial t^2 &= \partial^2({}^m W)/(\partial x \partial^m S_6) + \partial^2({}^m W)/(\partial y \partial^m S_2) + \partial^2({}^m W)/(\partial z \partial^m S_4), \\
 {}^p\rho \partial^2({}^p u_1)/\partial t^2 &= \partial({}^p T_1)/\partial x + \partial({}^p T_6)/\partial y + \partial({}^p T_5)/\partial z, \quad (1)
 \end{aligned}$$

$${}^p\rho \partial^2({}^p u_2)/\partial t^2 = \partial({}^p T_6)/\partial x + \partial({}^p T_2)/\partial y + \partial({}^p T_4)/\partial z;$$

$${}^s\rho \partial^2({}^s u_1)/\partial t^2 = \partial({}^s T_1)/\partial x + \partial({}^s T_6)/\partial y + \partial({}^s T_5)/\partial z,$$

$${}^s\rho \partial^2({}^s u_2)/\partial t^2 = \partial({}^s T_6)/\partial x + \partial({}^s T_2)/\partial y + \partial({}^s T_4)/\partial z;$$

где  ${}^m\rho$ ,  ${}^p\rho$  и  ${}^s\rho$  – плотности феррита, пьезоэлектрика и подложки,  ${}^m u_i$  и  ${}^p u_i$  – компоненты смещения фаз,  ${}^m S_i$  – компоненты деформации феррита,  ${}^p T_i$  и  ${}^s T_i$  – компоненты напряжений в пьезоэлектрике и подложке,  ${}^m W$  – плотность свободной энергии феррита, включающая зеэмановскую, магнитодипольную энергию, а также упругую и магнитоупругую энергию [7].

Уравнения упругости для пьезоэлектрической фазы и подложки имеют вид:

$${}^p T_4 = {}^p c_{44} {}^p S_4 - {}^p e_{15} {}^p E_2,$$

$${}^p T_5 = {}^p c_{44} {}^p S_5 - {}^p e_{15} {}^p E_1, \quad (2)$$

$${}^s T_4 = {}^s c_{44} {}^s S_4,$$

$${}^s T_5 = {}^s c_{44} {}^s S_5,$$

где  ${}^p S_i$  и  ${}^s S_i$  – компоненты деформаций,  ${}^p c_{44}$  и  ${}^s c_{44}$  – коэффициент жесткости пьезоэлектрика и подложки,  ${}^p e_{15}$  – пьезоэлектрический коэффициент,  ${}^p E_i$  – компоненты электрического поля.

Уравнение движения вектора намагниченности феррита может быть записано в виде:

$$\partial \mathbf{M} / \partial t = -\gamma [\mathbf{M}, \mathbf{H}_{eff}], \quad (3)$$

где  $\mathbf{H}_{eff} = -\partial({}^m W) / \partial \mathbf{M}$ ,  $\mathbf{M}$  – намагниченность феррита,  $\gamma$  – магнитомеханическое отношение.

Для гармонической волны, распространяющейся в направлении  $z$ , уравнения (1) и (3) с учетом (2) принимают вид:

$$\begin{aligned}
\omega m^+ &= \gamma (H_0 m^+ + B_2 \partial(m^+ u^+) / \partial z - 4 \pi M_0 m^+ - M_0 H^+), \\
-\omega^2 m^+ \rho^+ u^+ &= {}^m c_{44}^+ \partial^2(m^+ u^+) / \partial z^2, \\
-\omega^2 p^+ \rho^+ u^+ &= {}^p c_{44} \partial^2(p^+ u^+) / \partial z^2, \\
-\omega^2 s^+ \rho^+ u^+ &= {}^s c_{44} \partial^2(s^+ u^+) / \partial z^2.
\end{aligned} \tag{4}$$

где  $\omega$  – частота,  $m$  – переменная намагниченность,  $B_2$  – магнитоупругая константа,  $m^+ = m_1 + i m_2$ , аналогично определяются  $u^+$ ,  $p^+$ ,  $H^+$ ,  $s^+$ ,  ${}^m c_{44}^+ = {}^m c_{44} + \gamma B_2^2 / [M_0 (\omega - \gamma H_0 + \gamma 4\pi M_0)]$ . При выводе уравнений (4) полагалось, что  $m \ll M$ .

Для решения системы уравнений (4) необходимо использовать граничные условия, заключающиеся в равенстве компонент смещений и механических напряжений на границах раздела ферритовой и пьезоэлектрической фаз и подложки, при этом на свободных границах механическое напряжение обращается в нуль.

Подстановка решений системы уравнений (4) в условие разомкнутой электрической цепи  $\int_{pA} ({}^p e_{15} S^+ + {}^p \epsilon_{11} E^+ dz) = 0$ , ( $pA$  – поперечное сечение пьезоэлектрического слоя) позволяет получить выражение для МЭ-коэффициента по напряжению:

$$\alpha_E = \frac{\gamma^p e_{15} B_2 (Q_3 - 1)(Q_1 - 1)}{(\omega - \mathcal{H}_0 + 4\gamma\pi M_0) \{ [R_1 Q_2 \frac{{}^p k^p c_{44}}{{}^s k^s c_{44}} + R_2 Q_1]^p L^p \epsilon_{11} + [2R_1 (Q_1 - 1) \frac{{}^p c_{44}^p k}{{}^s k^s c_{44}} + R_2 Q_2 \frac{{}^s c_{44}^s k}{{}^p c_{44}^p k}]^p e_{15}^2 \}}; \tag{5}$$

где  $R_1 = (Q_5 Q_3^s k^s c_{44} - Q_6 Q_4^m k^m c_{44})$ ,  $R_2 = (Q_6 Q_3^s k^s c_{44} + Q_5 Q_4^m k^m c_{44})$ ,

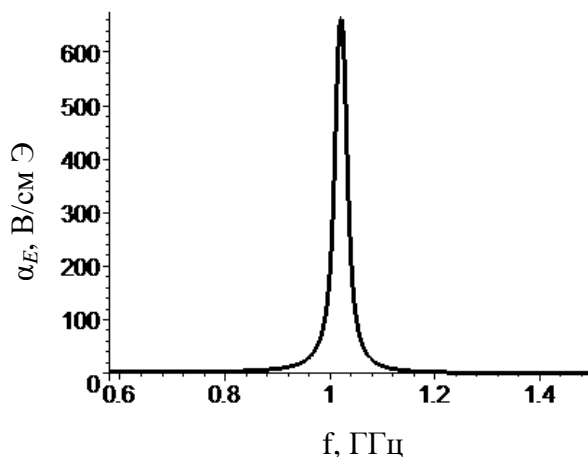
$Q_1 = \cos({}^p k^p L)$ ,  $Q_2 = \sin({}^p k^p L)$ ,  $Q_3 = \cos({}^m k^m L)$ ,  $Q_4 = \sin({}^m k^m L)$ ,  $Q_5 = \cos({}^s k^s L)$ ,  $Q_6 = \sin({}^s k^s L)$ ,

$${}^p k = \omega \sqrt{{}^p \rho / {}^p c_{44}}, \quad {}^m k = \omega \sqrt{{}^m \rho / {}^m c_{44}^+}, \quad {}^s k = \omega \sqrt{{}^s \rho / {}^s c_{44}}, \quad {}^m c_{44}^+ = {}^m c_{44} + \frac{\gamma B_2^2}{M_0 (\omega - \mathcal{H}_0 + 4\gamma\pi M_0)}.$$

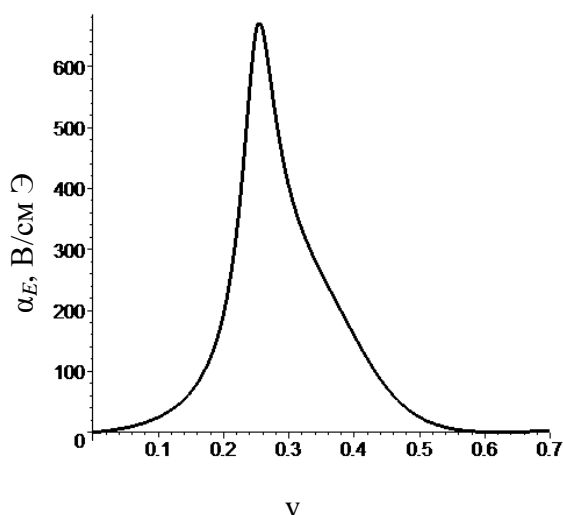
В качестве примера применим полученное выражение для оценки МЭ-коэффициента по напряжению для двухслойной структуры: титанат бария (ТБ) – иттрий-железистый гранат (ИЖГ) на подложке из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ). На рис. 2 приведена зависимость  $|\alpha_E|$  от частоты для свободной структуры ИЖГ – ТБ. Толщины

пьезоэлектрической и ферритовой фаз равны соответственно 0,8 и 2,4 мкм. Потери в образце учтены подстановкой в (5) комплексной частоты  $\Omega = \omega + i\omega_1$ , где  $\omega_1/\omega = 10^{-2}$ .

Как следует из рис. 2, в области совпадения частот электромеханического и магнитного резонансов наблюдается гигантское увеличение МЭ-эффекта, что обусловлено связанными колебаниями механической и магнитной систем. Выбор оптимальных значений толщин пьезоэлектрического и магнитного слоев может быть произведен на основе анализа выражения (5). В качестве примера на рис. 3 приведена зависимость МЭ-коэффициента от объемной доли ТБ в свободной структуре ИЖГ – ТБ.



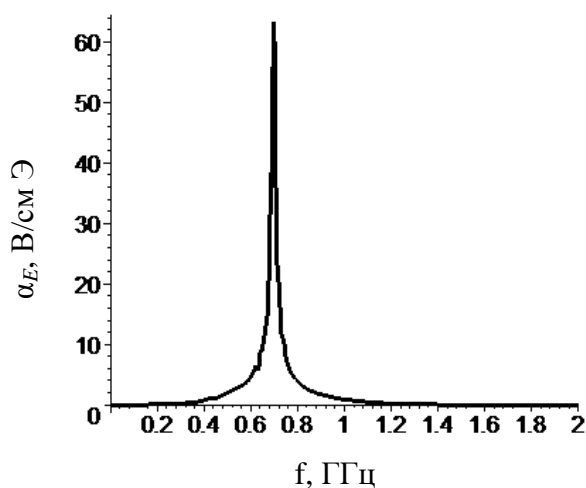
**Рисунок 2.** Зависимость МЭ-коэффициента по напряжению от частоты для свободно стоящей структуры ИЖГ – ТБ для подмагничивающего поля  $H_0=2115$  Э. Толщины слоев ИЖГ и ТБ равны 2,4 и 0,8 мкм.



**Рисунок 3.** Зависимость МЭ-коэффициента по напряжению от объемной доли пьезоэлектрика для свободно стоящей структуры ИЖГ – ТБ для подмагничивающего поля  $H_0=2115$  Э, частоты 1 ГГц и суммарной толщины структуры 3,2 мкм.

Анализ зависимости, приведенной на рис. 3, показывает, что для обеспечения наибольшего МЭ-эффекта в данном случае толщина ферритового слоя должна быть в три раза больше, чем толщина пьезоэлектрика.

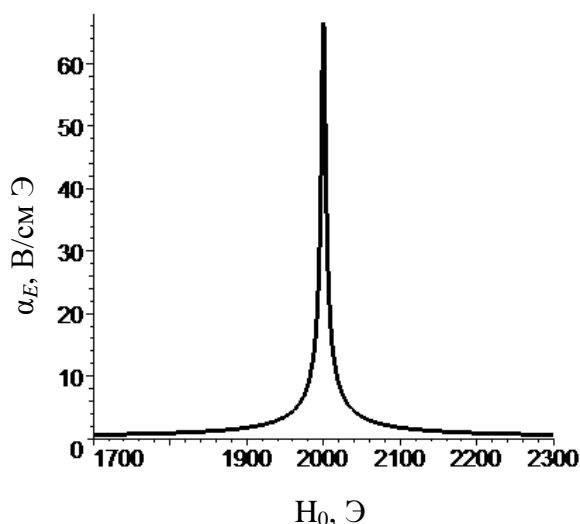
Для феррит-пьезоэлектрической структуры на подложке максимальное значение МЭ-коэффициента по напряжению уменьшается с увеличением толщины подложки вследствие эффекта зажатия. Спектр ЭМР структуры с учетом влияния подложки состоит из семейства равноудаленных линий. Расстояние между двумя соседними пиками определяется в основном толщиной подложки. Максимум огибающей резонансных линий наблюдается на частотах, соответствующих ЭМР двухслойной феррит-пьезоэлектрической структуры. Частотная зависимость МЭ-коэффициента по напряжению показана на рис. 4 для структуры ИЖГ – ТБ на подложке из ГГГ.



**Рисунок 4. Зависимость МЭ-коэффициента по напряжению от частоты для структуры ИЖГ – ТБ на подложке из ГГГ для подмагничивающего поля  $H_0=2$  кЭ. Толщины слоев ИЖГ, ТБ и ГГГ равны соответственно 2,4 мкм, 0,8 мкм и 0,1 мм.**

Частота МАР для структуры ИЖГ – ТБ на подложке из ГГГ (рис. 4) уменьшилась по сравнению со свободной структурой ИЖГ – ТБ, что связано с эффектом зажатия структуры со стороны подложки. При этом максимальное значение МЭ-коэффициента также уменьшилось до 63 В/(см·Э).

Известно, что магнитный резонанс можно наблюдать при изменении частоты и фиксированном подмагничивающем поле, а также при изменении подмагничивающего поля при постоянной частоте. На рис. 5 приведена зависимость МЭ-коэффициента по напряжению как функция подмагничивающего поля для структуры ИЖГ – ТБ на подложке из ГГГ при фиксированной частоте.



**Рисунок 5. Зависимость МЭ-коэффициента по напряжению от подмагничивающего поля для структуры ИЖГ – ТБ на подложке из ГГГ для частоты 0,7 ГГц. Толщины слоев ИЖГ, ТБ и ГГГ равны соответственно 2,4 мкм, 0,8 мкм и 0,1 мм.**

Рис. 5 показывает, что резонансное магнитное поле для феррит-пьезоэлектрической структуры на подложке равно 2 кЭ, в то время как для свободной структуры его величина составляет 2,115 кЭ. Уменьшение величины резонансного значения подмагничивающего поля связано с зажатием феррит-пьезоэлектрической структуры со стороны подложки.

### **Заключение**

В данной работе получено выражение для МЭ-коэффициента по напряжению в области совпадения частот электромеханического и магнитного резонансов для двухслойной феррит-пьезоэлектрической структуры на диэлектрической подложке. Приведена зависимость МЭ-коэффициента по напряжению от частоты, подмагничивающего поля, а также объемной доли ТБ для двухслойной структуры ИЖГ – ТБ на подложке из ГГГ. В области магнитоакустического резонанса при совпадении частот ЭМР и однородной прецессии намагниченности ферритовой фазы наблюдается существенное увеличение МЭ-коэффициента по напряжению.

Расчетное значение МЭ-коэффициента по напряжению позволяет рекомендовать слоистые композиционные материалы на основе монокристаллических ферритов и пьезоэлектриков для использования в радиокомпонентах, работа которых основана на генерации магнитоупругих волн или на управлении параметрами магнитного резонанса с помощью электрического поля.

*Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.*

### **Список литературы**

1. Бичурин М.И., Петров В.М. и др. Магнитоэлектрические материалы. – М. : Академия естествознания, 2006. – 296 с.
2. Бичурин М.И., Петров В.М., Рябков О.В. и др. Магнитоэлектрический эффект в феррит-пьезоэлектрических композитах в области магнитоакустического резонанса // *Фундаментальные исследования*. – 2005. – № 3. – С. 27 – 29.
3. Bichurin M.I., Petrov V.M., and Priya S. Magnetolectric Multiferroic Composites. In: *Ferroelectrics – Physical Effects* / Ed. Mickaël Lallart. – InTech, 2011. – P. 277-302.
4. Bichurin M.I., Petrov V.M., Ryabkov O.V. et al. Theory of magnetolectric effects at magnetoacoustic resonance in single-crystal ferromagnetic-ferroelectric heterostructures // *Phys. Rev. B*. – 2005. – V. 72. – P. 060408(R) (1-4).
5. Bichurin M.I., Petrov V.M., Averkin S.V., Filippov A.V., Liverts E., Mandal S. and Srinivasan G. J. // *Phys. D: Appl. Phys.* – 42 (2009). – P. 215001 (1-5).
6. *Magnetolectricity in Composites* / Eds. M.I. Bichurin and D. Viehland, Pan Stanford Pub, 2011. – 257 p.
7. *Физическая акустика* / под ред. У. Мэзона. – М. : Мир, 1968. – Т. III, ч. Б: Динамика решетки. – 392 с.

### **Рецензенты:**

Захаров А.Ю. д.ф.-м.н., профессор ФГБОУ ВПО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», г. Великий Новгород.

Корнышев Н.П., д.т.н., ведущий научный сотрудник НИИ ПТ «РАСТР», г. Великий Новгород.