

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ТРЕХСЛОЙНОЙ ФЕРРИТ-ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ В ОБЛАСТИ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

А.Ф.Саплев, В.М.Петров

MAGNETOELECTRIC EFFECT IN THREE-LAYER FERRITE-PIEZOELECTRIC STRUCTURE IN FIELD OF MAGNETIC RESONANCE

A.F.Saplev, V.M.Petrov

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, nightroud1991@yandex.ru

Представлены результаты рассмотрения магнитоэлектрического эффекта в феррит-пьезоэлектрических слоистых структурах в области ферромагнитного резонанса. Приложенное к пьезоэлектрическому слою электрическое поле приводит к деформации ферритового слоя, в результате чего в ферритовой компоненте появляется магнитная анизотропия, которая является неоднородной по толщине. В работе исследована теоретическая модель влияния внешнего электрического поля на высокочастотную магнитную восприимчивость. Рассмотрение проведено с учетом изгибных деформаций образца. Результаты моделирования изучены на примере трехслойных структур на основе феррита никеля и титаната-цирконата свинца. Показано, что внешнее электрическое поле приводит к уширению линии магнитного резонанса, величина которого определяется отношением толщин слоев структуры. Результаты работы представляют интерес с точки зрения использования в феррит-пьезоэлектрических микроволновых устройствах.

Ключевые слова: феррит, магнитоэлектрический эффект, магнитоакустический резонанс, слоистая структура

Для цитирования: Саплев А.Ф., Петров В.М. Магнитоэлектрический эффект в трехслойной феррит-пьезоэлектрической структуре в области магнитного резонанса // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №4(125). С.57-59. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).57-59](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).57-59)

The paper presents the results of consideration of the magnetoelectric effect in ferrite-piezoelectric layered structures in the field of ferromagnetic resonance. The electric field applied to the piezoelectric layer leads to the deformation of the ferrite layer. As a result, induced magnetic anisotropy is obtained in the ferrite component which is generally non-uniform across the thickness. A theoretical model for describing the external electric field effect on microwave magnetic susceptibility has been investigated. The flexural deformations of the sample have been considered in the calculations. The result of modeling has been studied on the example of three-layer structures based on nickel ferrite and lead-zirconate titanate. It is shown that an external electric field leads to a broadening of the magnetic resonance line. The magnitude of resonance line broadening is determined by the layer thickness ratio. The results are of importance for ferrite-piezoelectric microwave devices.

Keywords: ferrite, magnetoelectric effect, magnetoacoustic resonance, layered structure

For citation: Saplev A.F., Petrov V.M. Magnetoelectric effect in three-layer ferrite-piezoelectric structure in field of magnetic resonance // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №4(125). P.57-59. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).57-59](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).57-59)

Введение

Магнитоэлектрический (МЭ) эффект заключается в возникновении поляризации образца во внешнем магнитном поле или в намагничивании во внешнем электрическом поле. В магнитоэлектрически-пьезоэлектрических мультиферроиках этот эффект обусловлен механическими деформациями. Постоянное электрическое поле, приложенное перпендикулярно плоскости пьезоэлектрического слоя, создает в этом слое механические напряжения, которые способствуют индуцированию наведенной магнитной анизотропии в ферритовом слое. В результате можно наблюдать изменение спектра магнитного резонанса, которое в общем случае проявляется в виде сдвига и уширения линии ФМР [1].

1. Теоретическое моделирование магнитного резонанса с учетом магнитоэлектрического эффекта

Рассмотрим трехслойную структуру состава пьезоэлектрик—феррит—пьезоэлектрик. Будем считать, что для обеспечения однодоменной структуры к ферритовой компоненте приложено подмагничивающее поле H_0 достаточной величины. Будем также считать, что к образцу приложено переменное магнитное поле H , необходимое для наблюдения магнитного резонанса. Пусть подмагничивающее поле H_0 направлено по оси Oz , а переменное поле H лежит в плоскости xOy .

Теоретическое моделирование изменения спектра магнитного резонанса [1,2-4], индуцированного приложенным электрическим полем, осно-

вано на решении уравнения движения намагниченности M :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\gamma[M, H_{eff}]. \quad (1)$$

Используя плотность свободной энергии феррита mW , можно найти эффективное магнитное поле из соотношения

$$H_{eff} = -\frac{\partial {}^mW}{\partial M}. \quad (2)$$

Известно, что плотность свободной энергии монокристалла феррита включает энергию Зеемана $W_H = -M \cdot H_i$, энергию магнитной кристаллографической анизотропии, энергию анизотропии формы, а также магнитоупругую энергию:

$${}^mW = W_H + W_{an} + W_{ma} + W_{ac}, \quad (3)$$

где H_i — внутреннее магнитное поле, включающее поле размагничивания, W_{an} — энергия кубической кристаллической анизотропии, которая с учетом константой кубической анизотропией K_1 описывается формулой и:

$$W_{an} = \frac{K_1}{M_0^4} (M_1^2 M_2^2 + M_2^2 M_3^2 + M_3^2 M_1^2), \quad (4)$$

где M_0 — намагниченность насыщения феррита.

Магнитоупругая энергия может быть записана в виде:

$$W_{ma} = \frac{B_1}{M_0^2 (M_1^{2m} S_1 + M_2^{2m} S_2 + M_3^{2m} S_3)} + \frac{B_1}{M_0^2 (M_1 M_2^m S_6 + M_2 M_3^m S_4 + M_1 M_3^m S_5)}, \quad (5)$$

где B_1 и B_2 — магнитоупругие константы, S_i — деформации. Упругую энергию можно представить в следующем виде:

$$W_{ac} = \frac{m c_{11} ({}^m S_1^2 + {}^m S_2^2 + {}^m S_3^2)}{2} + \frac{m c_{44} ({}^m S_4^2 + {}^m S_5^2 + {}^m S_6^2)}{2} + {}^m S_{12} ({}^m S_1 {}^m S_2 + {}^m S_2 {}^m S_3 + {}^m S_1 {}^m S_3), \quad (6)$$

где ${}^m c_{ij}$ — жесткость.

С целью упрощения решения уравнение движения намагниченности может быть линеаризовано. Для этого будем считать, что компоненты переменного магнитного поля H_{eff} и переменной намагниченности M пренебрежимо малы по сравнению с компонентами постоянного магнитного поля H_{e0} и намагниченности M_0 . Таким образом, для случая свободных колебаний, это уравнение можно привести к виду:

$$i\omega \mathbf{m} + \gamma \mathbf{m} \times \mathbf{H}_{e0} + \gamma \mathbf{M}_0 \times \mathbf{h}_{ef} + i\alpha \omega [\mathbf{m} \times \mathbf{M}_0] / M_0 = 0. \quad (7)$$

Для расчета изменения спектра ФМР необходимо определить компоненты тензора механических напряжений, создаваемых в ферритовом слое под воздействием электрического поля, приложенного к пьезоэлектрической компоненте.

Для компонент тензора деформаций и электрической индукции слоя ЦТС используются обобщенный закон Гука и материальное уравнение. Аналогичные выражения можно записать для ферритовой фазы:

$$S_{ij} = s_{ij} T_{ij} (z_j), \quad (8)$$

Будем предполагать, что слои рассматриваемой структуры имеют идеальный механический кон-

такт. Сдвиговые напряжения создают в каждом слое изгибающие моменты, поскольку сдвигающие усилия направлены несимметрично относительно срединных плоскостей слоев. С целью учета изгибных деформаций продольные аксиальные деформации слоев необходимо представить в виде функции вертикальной координаты z_i . Полагая эту функцию линейной, получим

$${}^j S_i = {}^j S_{i0} + z_j / R, \quad (9)$$

где ${}^j S_{i0}$ — осевая деформация слоя j вдоль направления длины образца (оси x), R — радиус кривизны, z_j отсчитывается от срединной плоскости j -слоя.

Для нахождения деформаций срединных плоскостей слоев и радиусов кривизны будем использовать условия равновесия структуры, которые заключаются в приравнивании нулю суммы аксиальных сил, действующих в каждом слое, а также в приравнивании суммы вращающих моментов, действующих на каждый слой, сумме моментов аксиальных сил.

Комплексная магнитная восприимчивость ферритовой фазы определяется выражениями

$$\chi' = \chi_0 \frac{\omega_0^2 (\omega_0^2 - \omega^2 + 2\alpha^2 \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \omega_0^2 \omega^2}, \quad (10)$$

$$\chi'' = \chi_0 \frac{\alpha \omega \omega_0 (\omega_0^2 + \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \omega_0^2 \omega^2},$$

где χ_0 — статическая восприимчивость феррита, α — параметр потерь, резонансная частота ω_0 может быть определена из решения уравнения (7).

2. Применение теоретической модели к расчету спектра магнитного резонанса

В качестве примера мы применим построенную модель для нахождения магнитной восприимчивости трехслойной структуры цирконат-титанат свинца—феррит никеля—цирконат-титанат свинца. Будем считать, что подмагничивающее и постоянное электрическое поля направлены вдоль оси $[100]$ феррита перпендикулярно плоскости образца. Если направления постоянной электрической поляризации верхнего и нижнего слоев пьезоэлектрика совпадают, то имеет место только продольная деформация слоев структуры при отсутствии изгиба. В этом случае будет наблюдаться только сдвиг линии ФМР без изменения формы линии по аналогии с магнитоэлектрическим (МЭ) эффектом в двухслойной структуре при толщине ферритового слоя, малой по сравнению с толщиной слоя пьезоэлектрика [2-4]. В данной работе рассмотрен случай поляризации верхнего и нижнего слоев пьезоэлектрика в противоположных направлениях. Очевидно, что в этом случае среднее значение аксиального механического напряжения обращается в нуль. В результате сдвиг линии ФМР отсутствует. Имеет место только уширение резонансной линии, связанное с изгибными деформациями.

Зависимость компонентов комплексной магнитной восприимчивости от подмагничивающего поля для рассматриваемой структуры приведена на рис.1 и 2

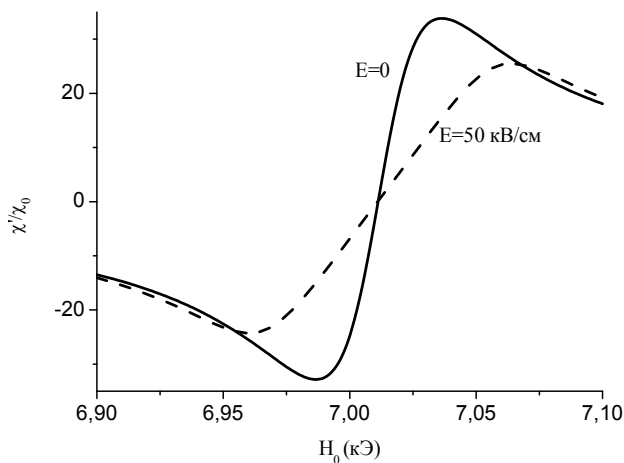


Рис.1. Зависимость действительной части магнитной восприимчивости от подмагничивающего поля в отсутствии и при наличии внешнего постоянного электрического поля для трехслойной структуры цирконат-титанат свинца—феррит никеля. Отношение толщин ферритовой и пьезоэлектрической фаз равно 1.7

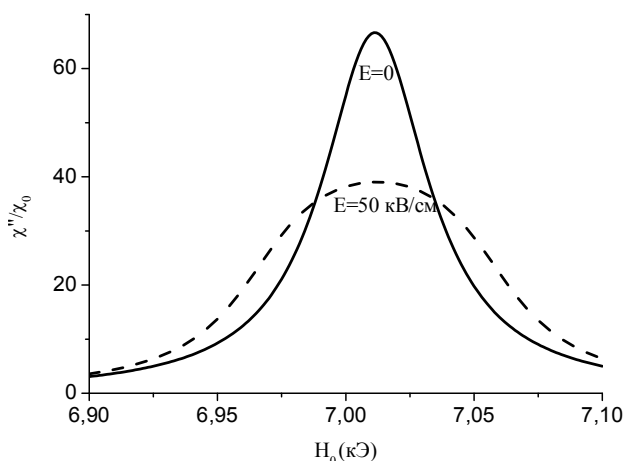


Рис.2. Зависимость мнимой части магнитной восприимчивости от подмагничивающего поля в отсутствии и при наличии внешнего постоянного электрического поля для трехслойной структуры цирконат-титанат свинца—феррит никеля—цирконат-титанат свинца. Отношение толщин ферритовой и пьезоэлектрической фаз равно 1.7

Анализ зависимостей, приведенных на рис.1 и 2, показывает, что размещение ферритового слоя между двумя пьезоэлектрическими слоями с про-

тивоположными направлениями поляризации приводит к уменьшению максимального поглощения мощности, при этом наблюдается уширение линии ФМР, индуцированное приложенным электрическим полем. Ширина линии, равная 40 Э при $E = 0$, возрастает до величины 90 Э в электрическом поле 50 В/см.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых микроволновых устройств, таких как полосовой фильтр с переменной полосой пропускания. При этом перестройка полосы пропускания реализуется путем подачи напряжения на электроды пьезоэлектрика. Кроме того, преимуществом предлагаемого метода перестройки полосы пропускания является возможность использования одного резонатора.

Заключение

Выполнено моделирование влияния МЭ эффекта на уширение линии ФМР для трехслойной структуры. Наличие второго слоя пьезоэлектрика с противоположным направлением поляризации приводит к возникновению изгибных деформаций образца. При этом приложение электрического поля 50 кВ/см приводит к двукратному уширению линии ФМР для трехслойной структуры цирконат-титанат свинца—феррит никеля—цирконат-титанат свинца.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании частотно-избирательных устройств СВЧ с электрическим управлением частотой и рабочим диапазоном частот.

1. Petrov V., Bichurin M., Saplev A., Tatarenko A., Lobekin V. Electric field induced broadening of magnetic resonance line in ferrite/piezoelectric bilayer. *J. Appl. Phys.*, 2017, vol. 121, p. 224103. doi: <https://doi.org/10.1063/1.4985069>
2. Bichurin M.I., Kornev I.A., Petrov V.M., Tatarenko A.S., Kiliba Yu.V., and Srinivasan G. Theory of magnetoelectric effects at microwave frequencies in a piezoelectric/magnetostrictive multilayer composite. *Phys. Rev. B*, 2001, vol. 64, p. 094409. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.64.094409>
3. Bichurin M.I., Petrov V.M. Modeling of magnetoelectric effects in composites. New York, Springer Series in Materials Science, 2014, vol. 201, 108 p.
4. Bichurin M.I., Petrov V.M., Galkina T.A. Microwave magnetoelectric effects in bilayer of ferrite and piezoelectric. *European Physical Journal Applied Physics*, 2009, vol. 45, p.30801