

“ЭФФЕКТ ПОДЛОЖКИ” ПРИ СДВИГЕ ЛИНИИ ФЕРРОМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА В МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

Иванов С.В.¹

¹*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Великий Новгород, e-mail: s243962@std.novsu.ru*

В статье рассмотрен магнитоэлектрический эффект в области ферромагнитного резонанса в композите PZN-PT (011) / ЖИГ (001) / ГГГ, в частности, “эффект подложки” - уменьшающий сдвиг резонансной линии относительно случая, когда используется магнитоэлектрический композит без подложки ГГГ. Методом исследования является теоретический расчет сдвига линии ФМР в магнитоэлектрических структурах, основанный на работе [1], с учетом подложки ГГГ. Для расчета было принято, что магнитоэлектрический композит находится в условиях механического равновесия. В расчете были исключены зависимости продольных сил по осям 1 и 2 и от изгибных деформаций по осям 2 и 1, соответственно. В связи с тем, что пьезоэлектрик PZN-PT (011) имеет высокие значения пьезомодулей, то сдвиг линии ФМР для композитов с данным пьезоэлектриком имеет намного большее значение, чем для композитов с кварцем и лангзатом [1]. По результатам расчетов было определено, что для структуры PZN-PT (011) / ЖИГ (001) / ГГГ сдвиг линии ФМР примерно в семь раз меньше, чем для структуры PZN-PT (011) / ЖИГ (001) для ориентации постоянного подмагничивающего поля вдоль осей 2 и 3. “Эффект подложки” обусловлен тем, что механические деформации, возникающие в пьезоэлектрике под действием электрического поля, при наличии подложки передаются не только на магнитоэлектрическую фазу композита, но и на подложку. Данный эффект ослабляет механические напряжения, возникающие в ЖИГ, по сравнению со случаем без подложки, и приводит к уменьшению сдвига линии ФМР.

Ключевые слова: Магнитоэлектрический эффект, ферромагнитный резонанс, эффект «подложки», сдвиг линии ФМР, теоретический расчет

THE “SUBSTRATE EFFECT” IN THE FERROMAGNETIC RESONANCE LINE SHIFT IN MAGNETOELECTRIC STRUCTURES

Ivanov S.V.¹

¹*Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, Velikiy Novgorod, e-mail: s243962@std.novsu.ru*

The article considers the magnetoelectric effect in the region of ferromagnetic resonance in the PZN-PT (011) / YIG (001) / GGG composite the “substrate effect”, which reduces the FMR line shift relative to the case when a magnetoelectric composite without a GGG substrate is used. The research method is the theoretical calculation of the FMR line shift in magnetoelectric structures, based on [1], considering the GGG substrate. For the calculation, it was assumed that the magnetoelectric composite is in mechanical equilibrium. Dependences of longitudinal forces along axes 1 and 2 on bending deformations along axes 2 and 1, respectively, were excluded in the calculation. Due to the fact that the PZN-PT (011) piezoelectric has high values of piezomodules, the FMR line

shift for composites with this piezoelectric is much greater than for composites with quartz and langatate [1]. According to the calculation results, it was determined that for the PZN-PT (011) / YIG (001) / GGG structure, the shift of the FMR line is approximately seven times less than for the PZN-PT (011) / YIG (001) structure for the orientation of a constant bias field along axes 2 and 3. The “substrate effect” is because mechanical deformations that occur in a piezoelectric under the action of an electric field, in the presence of a substrate, are transferred not only to the magnetostrictive phase of the composite, but also to the substrate. This effect weakens the mechanical stresses arising in the YIG, as compared to the case without a substrate, and leads to a decrease in the FMR line shift.

Keywords: Magnetoelectric effect, ferromagnetic resonance, “substrate” effect, FMR line shift, theoretical calculation

Введение

В области ферромагнитного резонанса (ФМР) магнитоэлектрический (МЭ) эффект заключается в изменении магнитной восприимчивости магнитострикционной фазы двухслойного магнитоэлектрического композита при наличии внешнего электрического поля, приложенного к пьезоэлектрической фазе данного композита.

Во внешнем электрическом поле E механическая деформация в пьезоэлектрической фазе композита, появляющаяся вследствие пьезоэффекта, передается магнитострикционной фазе и приводит к сдвигу резонансного магнитного поля [1].

Двухслойный магнитоэлектрический композит состоит из пьезоэлектрической фазы и магнитострикционной фазы и в данной работе в качестве ферритовой и пьезоэлектрической фазы применяются железоиттриевый гранат (ЖИГ) и PZN-PT (011). При производстве двухслойного магнитоэлектрического композита с тонким слоем ЖИГ данный слой эпитаксиальным методом формируют на подложке галлий-гадолиниевого граната (ГГГ). В таком случае при расчетах сдвига линии ФМР необходимо учитывать свойства данной подложки.

Цель исследования

Целью исследования является теоретическое определение влияния подложки ГГГ на сдвиг резонансной линии ФМР в МЭ пьезоэлектрических/ЖИГ/ГГГ структур и сравнение этих результатов с полученными ранее, когда влияние подложки не учитывалось.

Материал и методы исследования

Методом исследования является теоретический расчет сдвига линии ФМР в магнитоэлектрических структурах PZN-PT (011) / ЖИГ (001) и PZN-PT (011) / ЖИГ (001) / ГГГ, основанный на работе [3].

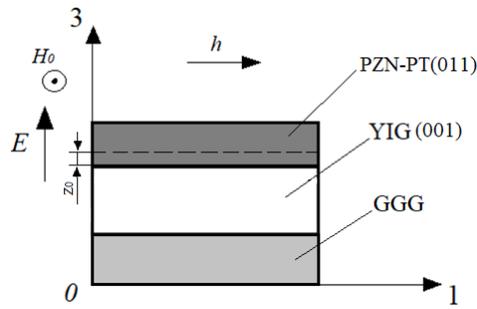


Рисунок 1 – Структура магнитоэлектрического композита PZN-PT (011) / ЖИГ (001) / ГГГ. Подмагничивающее постоянное поле H_0 и переменное магнитное поле h , внешнее электрическое поле E , приложенное к PZN-PT (011). z_0 – расстояние между нейтральной линией композита и верхней гранью пленки ЖИГ (001).

Материальные параметры пленки ЖИГ (001) были взяты в соответствии с [3], толщина пленки: ${}^m t = 5 \cdot 10^{-8} m$,

Материальные параметры пластинки PZN-PT (011): модули податливости: ${}^p s_{11} = 54 \cdot 10^{-12} m^2 / N$, ${}^p s_{12} = -41,6 \cdot 10^{-12} m^2 / N$, ${}^p s_{22} = 180 \cdot 10^{-12} m^2 / N$, толщина пластинки: ${}^p t = 5 \cdot 10^{-4} m$, пьезомодули: $d_{31} = 1,1 \cdot 10^{-9} m / V$, $d_{32} = -3 \cdot 10^{-9} m / V$.

Материальные параметры пластинки ГГГ: значения модулей податливости были взяты в соответствии с [2], толщина пластинки: ${}^s t = 5 \cdot 10^{-4} m$.

Результаты исследования и их обсуждение:

Рассмотрим тонкую пленку ЖИГ, вдоль плоскости которой приложено постоянное поле смещения H_0 . Будем считать, что величина этого поля достаточно велика и тонкая пленка ЖИГ однородно намагничена до насыщения. Ось 2 (y) направлена вдоль H_0 . Направим ось 1 (x) по краю пластины ГГГ, что совпадает с кристаллографическим направлением ЖИГ [100].

Поскольку в асимметричной МЭ структуре возбуждаются как продольные, так и изгибные моды колебаний по обеим осям X и Y [1], компоненты тензора деформации по осям 1 и 2 имеют вид:

$$S_1 = A_1 + zB_1, \quad S_2 = A_2 + zB_2, \quad (1)$$

где A_1 , A_2 и B_1 , B_2 - неизвестные константы, связанные с продольными и изгибными модами колебаний соответственно.

Рассмотрим механическое равновесие конструкции. Граничные условия для свободного образца в виде прямоугольного параллелепипеда:

$$\text{Тензоры механических напряжений фаз композита вдоль оси 3: } {}^s T_3 = {}^m T_3 = {}^p T_3 = 0.$$

Продольные силы в композите вдоль осей 1 и 2:

$$F_1 = \int_{-z_0-{}^m t-{}^s t}^{-z_0-{}^m t} {}^s T_1 dz + \int_{-z_0-{}^m t}^{-z_0} {}^m T_1 dz + \int_{-z_0}^{p t-z_0} {}^p T_1 dz = 0, \quad F_2 = \int_{-z_0-{}^m t-{}^s t}^{-z_0-{}^m t} {}^s T_2 dz + \int_{-z_0-{}^m t}^{-z_0} {}^m T_2 dz + \int_{-z_0}^{p t-z_0} {}^p T_2 dz = 0, \quad (2)$$

где T – механические напряжения фаз композита,

Изгибные моменты в композите вдоль осей 1 и 2:

$$M_1 = \int_{-z_0}^{-z_0 - m_t} z^s T_1 dz + \int_{-z_0 - m_t}^{-z_0} z^m T_1 dz + \int_{-z_0}^{p_t - z_0} z^p T_1 dz = 0, \quad M_2 = \int_{-z_0}^{-z_0 - m_t} z^s T_2 dz + \int_{-z_0 - m_t}^{-z_0} z^m T_2 dz + \int_{-z_0}^{p_t - z_0} z^p T_2 dz = 0. \quad (3)$$

Для поиска неизвестных констант в уравнениях (1) тензоры деформаций фаз композита вдоль осей 1 и 2, выражаются через материальные параметры фаз композита в соответствии с [3].

Подставив необходимые компоненты тензоров напряжений и деформаций и проинтегрировав выражения (8) и (9), сгруппируем полученные множители перед неизвестными константами A_1 , A_2 и B_1 , B_2 напряженностью электрического поля E . Для исключения зависимости продольных сил по осям 1 и 2 от изгибных деформаций по осям 2 и 1, соответственно, приравняем к нулю полученный множитель перед неизвестной константой B_2 для продольной силы F_1 , он же множитель перед неизвестной константой B_1 продольной силы F_2 . Тогда для изгибного момента M_1 множитель A_2 равен нулю, для изгибного момента M_2 множитель A_1 равен нулю.

Тогда расстояние между нейтральной линией композита и верхней гранью пленки ЖИГ (001) может быть найдено из равенства нулю коэффициента перед неизвестной константой B_2 для продольной силы F_1 .

Так как компоненты напряжений магнитоотрицательной фазы будут зависеть от z , а толщина магнитоотрицательной фазы мала, то в качестве z можно принять:

$$z = -\frac{m_t}{2} - z_0. \quad (4)$$

Подставив найденные константы A_1 , A_2 и B_1 , B_2 в уравнение (1) найдем величины напряжений магнитоотрицательной фазы композита ${}^m T_1$, ${}^m T_2$.

Сдвиг резонансной линии ФМР, при ориентации H_0 вдоль оси 2 рассчитывается по формуле:

$${}^1 \delta H_E = \frac{3\lambda_{100} (Q_1 \{ {}^m T_1 - {}^m T_2 \} - Q_3 {}^m T_2)}{\mu_0 M_0 Q_2}. \quad (5)$$

где: $Q_1 = H_0 - H_a + M_0$, $Q_2 = 2(H_0 - H_a) + M_0$, $Q_3 = H_0 - H_a$, μ_0 - магнитная постоянная.

Сдвиг резонансной линии ФМР, при ориентации H_0 вдоль оси 3 рассчитывается по формуле:

$${}^2 \delta H_E = \frac{3\lambda_{100} [{}^m T_1 + {}^m T_2]}{2\mu_0 M_0}. \quad (6)$$

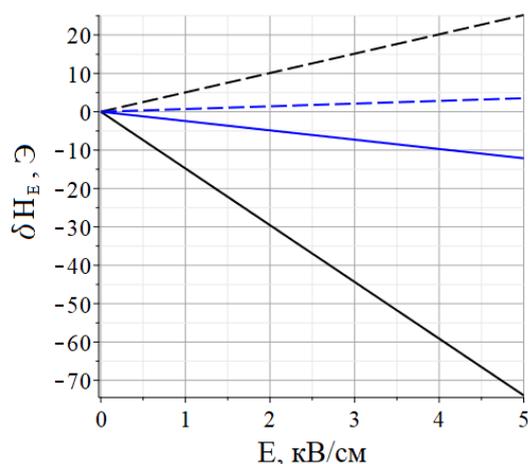


Рисунок 2 - Зависимость сдвига линии ФМР магнитоэлектрического композита от электрического поля E . PZN-PT (011) / ЖИГ (001) – черная линия, PZN-PT (011) / ЖИГ (001) / ГГГ – синяя линия. Сплошная линия — постоянное магнитное поле направленно в плоскости пленки ЖИГ вдоль оси 2 (y), пунктирная линия — постоянное магнитное поле направленно перпендикулярно пленке ЖИГ вдоль оси 3 (z).

Заключение

По результатам расчетов было определено, что для структуры PZN-PT (011) / ЖИГ (001) / ГГГ сдвиг линии ФМР примерно в семь раз меньше, чем для структуры PZN-PT (011) / ЖИГ (001) для обоих рассмотренных ориентаций подмагничивающего поля. “Эффект подложки” обусловлен тем, что механические деформации, возникающие в пьезоэлектрике под действием электрического поля, при наличии подложки передаются не только на магнитострикционную фазу, но и на подложку. Данный эффект ослабляет механические напряжения, возникающие в ЖИГ, по сравнению со случаем без подложки, и приводит к уменьшению сдвига линии ФМР.

Список литературы

1. M.I. Bichurin, V.M. Petrov, R.V. Petrov, A.S. Tatarenko, “Magnetolectric Composites”, Pan Stanford Publishing Pte. Ltd.: Singapore, 2019, 280p.
2. Сластен М.И. Константы упругости монокристаллического галлий-гадолиниевого граната // Известия ТРТУ. Специальный выпуск. Материалы XLVII научно-технической конференции. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. – № 1(24). – С. 223–224.
3. Соколов О. В., Бичурин М. И., Лобекин В. Н., Татаренко А. С. Микроволновый магнитоэлектрический эффект в двухслойных структурах на основе железа – иттриевого граната, кварца и магнониобата свинца // Вестн. Новг. гос. ун-та. Сер.: Технические науки. 2019. №4(116). С.92-95. Библиогр. 3 назв.