

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА В СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЕ ФЕРРИТ-ПЬЕЗОЭЛЕКТРИК

А.Ф.Саплев, В.М.Петров

CONTROL OF MAGNETIC RESONANCE PARAMETERS
IN A LAYERED FERRITE-PIEZOELECTRIC STRUCTURE

A.F.Saplev, V.M.Petrov

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

Представлены результаты моделирования спектра магнитного резонанса в феррит-пьезоэлектрических слоистых структурах при воздействии на образец внешнего электрического поля. Внешнее постоянное электрическое поле приводит к появлению в ферритовой компоненте дополнительной магнитной анизотропии, которая является неоднородной по толщине образца. Рассмотрено решение уравнения движения намагниченности ферритовой компоненты с учетом электрически индуцированной магнитной анизотропии. В расчетах учтены изгибные деформации образца. Результаты моделирования представлены на примере слоистых структур на основе железо-иттриевого граната и титаната-цирконата свинца. Для двухслойных и трехслойных структур получены значения уширения линии магнитного резонанса. Найдены оптимальные значения толщин слоев для получения максимального уширения резонансных линий. Результаты работы представляют интерес с точки зрения использования в феррит-пьезоэлектрических микроволновых устройствах.

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

Для цитирования: Саплев А.Ф., Петров В.М. Управление параметрами магнитного резонанса в слоистой структуре феррит-пьезоэлектрик // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2022. №3(128). С.108–110. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).108-110](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).108-110)

The article presents the results of studying the magnetic resonance spectrum in ferrite-piezoelectric layered structures under the influence of an external electric field on the sample. An external electric field induces a magnetic anisotropy in the ferrite component, which is inhomogeneous in the thickness of the sample. The paper considers the solution of the equation of the magnetization motion of the ferrite component, taking into account the electrically induced magnetic anisotropy. The calculations take into account the bending deformations of the sample. For two-layer and three-layer structures based on yttrium iron garnet and lead zirconate titanate, the values of the broadening of the magnetic resonance line have been obtained. The optimal values of the layer thicknesses for obtaining the maximum broadening of the resonance lines have been found. The results of the work are of interest for the new ferrite-piezoelectric microwave devices.

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

For citation: Saplev A.F., Petrov V.M. Control of magnetic resonance parameters in a layered ferrite-piezoelectric structure // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2022. №3(128). P.108–110. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).108-110](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).108-110)

Введение

Магнитоэлектрический эффект, как известно, состоит в индуцировании поляризации во внешнем магнитном поле и, наоборот, в индуцировании намагниченности во внешнем электрическом поле [1–3]. В слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах этот эффект обусловлен механическими деформациями. Приложение постоянного электрического поля перпендикулярно плоскости пьезоэлектрического слоя приводит к появлению механических напряжений, которые в свою очередь приводят к появлению наведенной магнитной анизотропии в ферритовом слое и, как следствие, к сдвигу резонансного магнитного поля и уширению линии ФМР [4–9].

1. Теоретическое моделирование

Будем считать, что к ферритовой компоненте приложено подмагничивающее поле H_0 достаточной величины, чтобы обеспечить однодоменную структуру. На образец воздействует также переменное

магнитное поле H , необходимое для наблюдения магнитного резонанса. При этом поле H_0 направлено по оси Oz , а переменное поле H лежит в плоскости xOy .

Для теоретического моделирования сдвига линии магнитного резонанса и дополнительного уширения линии, индуцированных приложенным электрическим полем, следует найти решение уравнения движения намагниченности [4]:

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

где эффективное поле определяется соотношением

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

В выражении (2) mW — плотность свободной энергии феррита, M — намагниченность. Плотность свободной энергии монокристалла феррита включает энергию магнитной кристаллографической анизотропии, анизотропии формы, а также магнитоупругую энергию:

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

где $W_H = -M \cdot H_i$ — энергия Зеемана, M — намагниченность, H_i — внутреннее магнитное поле, включающее поле размагничивания, W_{an} — энергия кубической кристаллической анизотропии с константой кубической анизотропией K_1 и намагниченностью насыщения M_0 :

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

Магнитоупругая энергия записывается в виде:

$$W_{ma} = \frac{B_1}{M_0^2 (M_1^{2m} S_1 + M_2^{2m} S_2 + M_3^{2m} S_3)} + \frac{B_2}{M_0^2 (M_1 M_2 {}^m S_6 + M_2 M_3 {}^m S_4 + M_1 M_3 {}^m S_5)}, \quad (5)$$

где B_1 и B_2 — магнитоупругие константы, S_i — деформации. Наконец, упругую энергию можно представить как:

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

где ${}^m c_{ij}$ — модуль упругости.

Для упрощения можно линеаризовать уравнение движения [3]. Предполагаем, что переменное магнитное поле H_{eff} и намагниченность M компоненты пренебрежимо малы по сравнению с компонентами постоянного тока H_{ef0} и M_0 , где M_0 — намагниченность насыщения. Для случая свободных колебаний это уравнение принимает вид:

$$i\omega \mathbf{m} + \gamma \mathbf{m} \times \mathbf{H}_{ef0} + \gamma \mathbf{M}_0 \times \mathbf{h}_{ef} + i\alpha \omega [\mathbf{m} \times \mathbf{M}_0]/M_0 = 0. \quad (7)$$

Для расчета сдвига линии ФМР необходимо определить компоненты тензора механических напряжений, создаваемых в ферритовом слое под воздействием электрического поля. С этой целью рассмотрим двухслойную структуру состава железо-иттриевый гранат (ЖИГ) — пьезоэлектрический твердый раствор PMN-PT, как показано на рис.1.

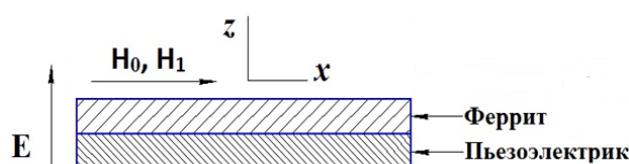


Рис.1. Двухслойная структура: феррит-пьезоэлектрик

Очевидно, внешнее электрическое поле равно среднему значению электрического поля в пьезоэлектрическом слое.

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

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

Считается, что все слои рассматриваемой структуры имеют идеальный механический контакт. При этом сдвиговые напряжения создают в каждом слое изгибающие моменты, поскольку сдвигающие усилия направлены несимметрично относительно срединных плоскостей слоев. Для учета изгибных деформаций продольные аксиальные деформации

слоев следует представить в виде функции вертикальной координаты zi [10]

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

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

$${}^m S_{j0} - {}^p S_{j0} = \frac{h_p}{R_j}, \quad (10)$$

$${}^g S_{j0} - {}^m S_{j0} = \frac{h_g}{R_j}. \quad (11)$$

Из геометрических соображений ясно, что $h_p = ({}^m t + {}^p t)/2$, $h_g = ({}^m t + {}^p t)/2$, ${}^m t$ и ${}^p t$ — толщины ферритового и пьезоэлектрического слоев соответственно.

Для нахождения деформаций срединных плоскостей 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.

2. Результаты расчета для структур на основе ЖИГ и ЦТС

В качестве примеров мы применим модели двух-, трех- и пятислойной структуры железо-иттриевого граната и ЦТС. Двухслойная структура показана на рис.1. Зависимость на рис.2. показывает, что максимальное уширение линии ФМР 7 Э наблюдается при отношении толщин слоев ЦТС к ЖИГ, равном 1,3.

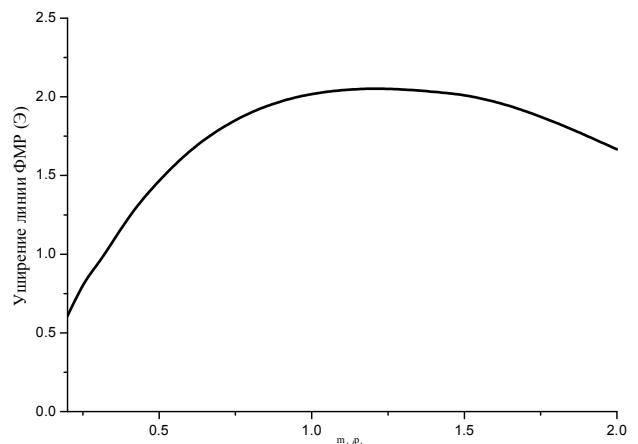


Рис.2. Зависимость уширения линии ФМР от отношения толщины слоя ЖИГ к ЦТС. Внешнее постоянное электрическое поле равно 5 кВ.см

Добавим второй слой ЦТС, но направление поляризации ее будет противоположно первому слоя ЦТС. Это нужно для формирования изгиба образца (рис.3).

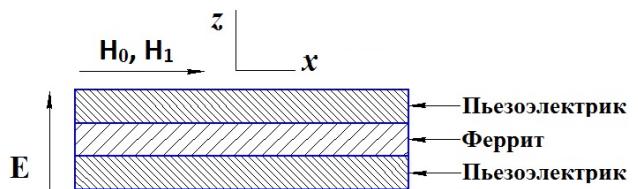


Рис.3. Трехслойная структура: пьезоэлектрик — феррит — пьезоэлектрик

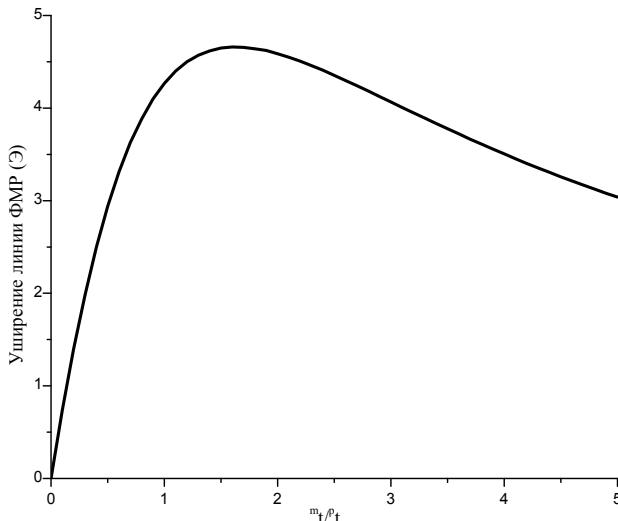


Рис.4. Зависимость уширения линии ФМР для трехслойной структуры от отношения толщины слоя ЖИГ к ЦТС

Как следует из графика на рис.4, максимальное уширение линии ФМР 9,2 Э наблюдается при отношении толщин слоев ЦТС к ЖИГ, равном 1,7.

Для уменьшения влияния пьезоэлектрика на феррит добавим буферный слой из галлий-гадолиниевого граната между слоями ЦТС к ЖИГ.

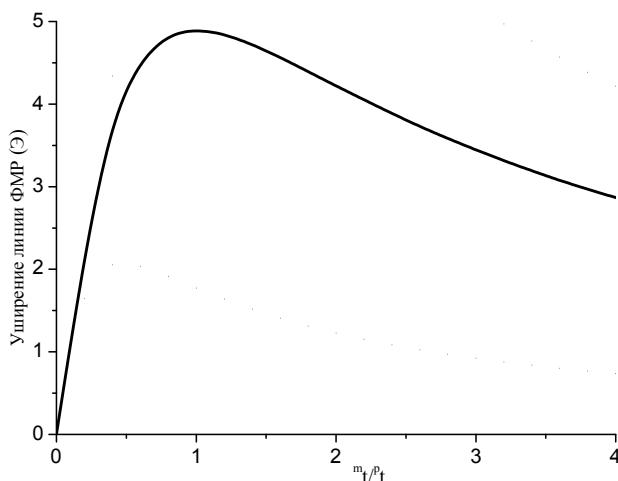


Рис.5. Зависимость уширения линии ФМР от отношения толщин слоев ЖИГ и ЦТС для отношения толщин буферного слоя и феррита 0,5

График на рис.5 показывает, что максимальное уширение линии ФМР наблюдается при отношении толщин слоев ЦТС и ЖИГ, равном 1.

Заключение

Моделирование влияния МЭ эффекта на уширение линии ФМР:

— для двухслойной структуры максимальное уширение линии ФМР 7 Э наблюдается при отношении толщин слоев ЦТС к ЖИГ, равном 1,3;

— для трехслойной структуры добавление второго слоя пьезоэлектрика с противоположным направлением магнитострикции дает больший изгиб образца. Максимальное уширение линии ФМР 9,2 Э наблюдается при отношении толщин слоев ЦТС к ЖИГ, равном 1,7;

— для структуры с буферными слоями между ферритом и пьезоэлектриками — уменьшило влияние пьезоэлектриков на феррит. Максимальное уширение линии ФМР наблюдается при отношении толщин слоев ЦТС к ЖИГ, равном 1 для отношения толщин буферного слоя и феррита 0,5.

Полученные данные могут быть использованы для конструирования СВЧ-фильтров с управляемой полосой пропускания.

1. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., et al. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions. *J. Appl. Phys.*, 2008, vol. 103, p. 031101. doi: <https://doi.org/10.1063/1.2836410>
2. Fiebig M. Revival of the magnetoelectric effect. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2005, vol. 38(8), pp. R123-R152.
3. Bichurin M.I., Petrov V.M., Petrov R.V., Tatarenko A.S. Pan Stanford Publishing Pte. Ltd, 2019. 296 p.
4. 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(9). doi:10.1103/PhysRevB.64.094409
5. Shastray S., Srinivasan G., Bichurin M.I., Petrov V.M., and Tatarenko A.S. Microwave magnetoelectric effects in single crystal bilayers of yttrium iron garnet and lead magnesium niobate-lead titanate. *Phys. Rev. B*, 2004, vol. 70(6), p. 064416.
6. Pettiford C., Dasgupta S., Lou J., Yoon S. D., and Sun N. X. Bias Field Effects on Microwave Frequency Behavior of PZT/YIG Magnetoelectric Bilayer. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, vol. 43(7), p. 3343.
7. Liu M., Zhou Z., Nan T., Howe B.M., Brown G.J., and Sun N.X. Voltage Tuning of Ferromagnetic Resonance with Bistable Magnetization Switching in Energy-Efficient Magnetoelectric Composites. *Adv. Mater.*, 2013, vol. 25, p. 1435. doi:10.1002/adma.201203792
8. Dong G., Wang T., Liu a.o. H. Strain-Induced Magnetoelectric Coupling in $Fe_3O_4/BaTiO_3$ Nanopillar Composites. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, vol. 14, no. 11, pp. 13925–13931. doi: <https://doi.org/10.1021/acsmi.2c00058>
9. Tatarenko S., Bichurin M.I. Microwave Magnetoelectric Devices. *Advances in Condensed Matter Physics*, 2012, p. 286562. doi: <https://doi.org/10.1155/2012/286562>
10. Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. *Theory of plates and shells*. Mc Oraw-Hill Book Company, Inc, New York Toronto London, 1959.