

УДК 537.9

ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ИНДУЦИРОВАННОЕ УШИРЕНИЕ ЛИНИИ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ФЕРРИТА И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКА

А.Ф.Сапле, В.М.Петров, М.И.Бичурин

ELECTRICALLY INDUCED BROADENING OF MAGNETIC RESONANCE LINE IN FERRITE-PIEZOELECTRIC LAMINATES

A.F.Saplev, V.M.Petrov, M.I.Bichurin

Институт электронных и информационных систем НовГУ, nightroud1991@yandex.ru

Рассмотрен магнитоэлектрический эффект в феррит-пьезоэлектрических слоистых структурах в области ферромагнитного резонанса. Постоянное электрическое поле, приложенное к пьезоэлектрическому слою, приводит к деформации ферритового слоя. В результате в ферритовой компоненте создается наведенная магнитная анизотропия, которая в общем случае неоднородна по толщине. Представлена теоретическая модель, описывающая влияние внешнего электрического поля на высокочастотную магнитную восприимчивость с учетом изгибных деформаций образца. Результаты моделирования рассмотрены на примере слоистых структур состава феррит никеля—титанат-цирконат свинца. Показано, что внешнее электрическое поле приводит к сдвигу и уширению линии магнитного резонанса, величина которых зависит от состава и толщин слоев структуры. Результаты работы представляют интерес с точки зрения использования в феррит-пьезоэлектрических микроволновых устройствах.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, ферромагнитный резонанс, структура феррит-пьезоэлектрик

This paper considers magnetoelectric effects in ferrite-piezoelectric laminates in the ferromagnetic resonance region. A dc electric field applied to the piezoelectric layer leads to 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. The authors presented a theoretical model which describes the electric field effect on the microwave magnetic susceptibility taking into account the flexural deformations of the sample. The simulation results are considered by the example of layered structures based on nickel ferrite and lead titanate-zirconate. It is shown that the external electric field leads to a shift and broadening of magnetic resonance line. The magnitude of resonance line shift and broadening depends on the sample composition and layer thickness. The results are of importance for ferrite-piezoelectric microwave devices.

Keywords: magnetoelectric effect, ferromagnetic resonance, ferrite-piezoelectric structure

Введение

Магнитоэлектрический эффект, как известно, состоит в индуцировании поляризации во внешнем магнитном поле и, наоборот, в индуцировании намагниченности во внешнем электрическом поле. В слоистых магнитоэлектрических 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 [1].

1. Теоретическое моделирование магнитного резонанса с учетом внешнего электрического поля

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 [2-4] и дополнительного уширения линии [1], индуцированных приложенным электрическим полем, следует найти решение уравнения движения намагниченности.

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

где эффективное поле определяется соотношением

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

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

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

где $W_H = -M \cdot Hi$ — энергия Зеемана, M — намагниченность, Hi — 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:

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

где B_1 и B_2 — магнитоупругие константы, S_i — деформации. 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. 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:

$$i\omega t + \gamma t \times H_{ef0} + \gamma M_0 \times h_{ef} + i\alpha \omega [m \times M_0] / M_0 = 0. \quad (7)$$

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 феррит никеля — пьезоэлектрический ЦТС, как показано на рис.1.

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

Для компонент тензора деформаций и электрической индукции слоя ЦТС 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 z_i

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

где $^j S_{i0}$ — осевая деформация слоя j вдоль направления длины образца (оси x) при R радиус 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 $h_p = (^m t + ^p t)/2$, $h_g = (^m t + ^p t)/2$, где $^m t$, $^p t$ — 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 феррита никеля и ЦТС

В качестве примеров рассмотрим модели двух-, трех- и пятислойной структуры феррита никеля и ЦТС. На рис.1 показана двухслойная структура. Предполагается, что подмагничивающее и постоянное электрическое поле направлены вдоль оси $[100]$ перпендикулярно плоскости образца. Расчетное уширение линии ФМР от отношения толщины слоя феррита никеля приведено на рис.2.

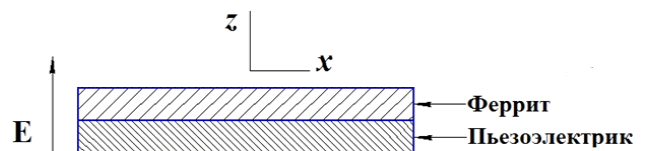


Рис.1. Двухслойная структура феррит-пьезоэлектрик

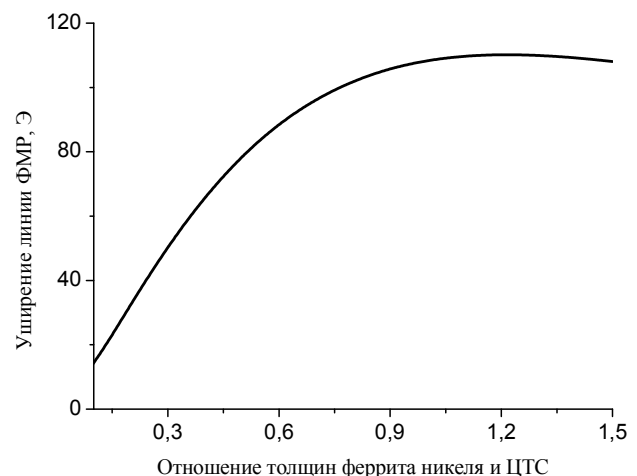


Рис.2. Зависимость уширения линии ФМР от отношения толщины слоя феррита никеля к ЦТС при $E = 6$ кВ/см

Результаты моделирования, приведенные на рис.2, показывают, что максимальное уширение линии ФМР 93 Э наблюдается при отношении толщин слоев феррита никеля и ЦТС, равном 1,3.

Добавим второй слой ЦТС, для которого направление поляризации противоположно направлению поляризации первого слоя ЦТС. При этом в ферритовом слое будут наблюдаться только изгибные деформации (рис.3).

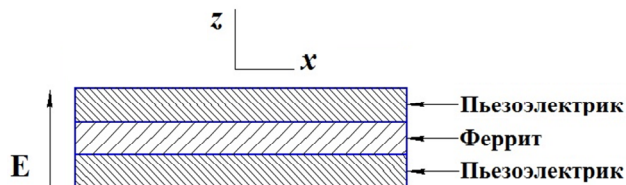


Рис.3. Трехслойная структура пьезоэлектрик—феррит—пьезоэлектрик

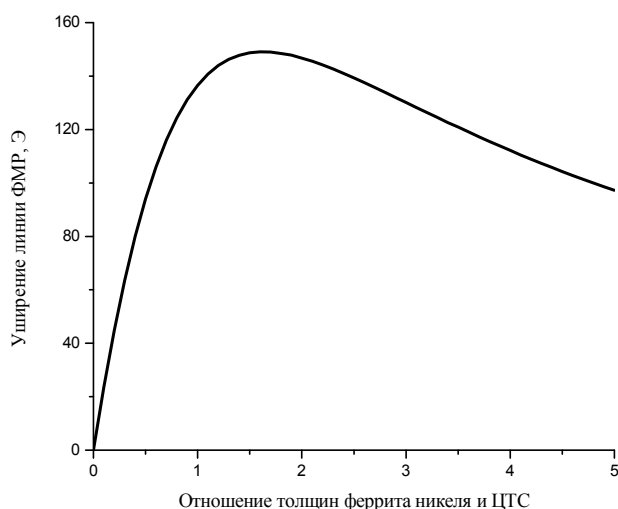


Рис.4. Зависимость уширения линии ФМР от отношения толщины слоя феррита никеля и ЦТС

Максимальное уширение линии ФМР, согласно данным рис.4 равное 150 Э, наблюдается при отношении толщин слоев феррита никеля и ЦТС, равном 1,7.

Для уменьшения влияния пьезоэлектрика на СВЧ поле в феррите можно использовать дополнительный буферный слой между слоями, как показано на рис.5. В работе предполагается, что буферный слой состоит из галлий-гадолиниевого граната.

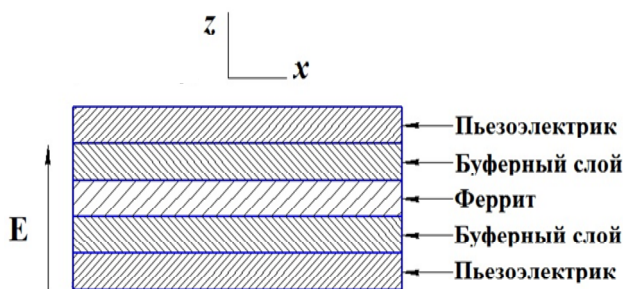


Рис.5. Пятислойная структура пьезоэлектрик—буферный слой—феррит—буферный слой—пьезоэлектрик

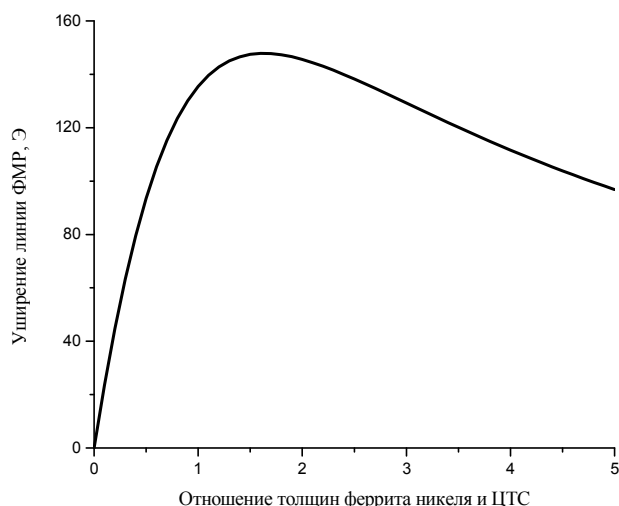


Рис.6. Зависимость уширения линии ФМР от отношения толщины слоя феррита никеля и ЦТС. Отношение толщины буферного слоя к толщине слоя феррита равно 0,01

Как следует из данных рис.6, максимальное уширение линии ФМР 145 Э наблюдается при отношении толщин слоев феррита никеля и ЦТС, равном 1,7.

Сравнение структур

Количество слоев	Уширение линии ФМР, Э	Отношение толщин феррита и пьезоэлектрика
Двухслойная структура	93	1,3
Трехслойная структура	150	1,7
Пятислойная структура	145	1,5

Закключение

1. Моделирование влияния МЭ эффекта на уширение линии ФМР для двухслойной структуры. На графике видно, что максимальное уширение линии ФМР 93 Э наблюдается при отношении толщин слоев феррита никеля и ЦТС, равном 1,3.

2. Моделирование влияния МЭ эффекта на уширение линии ФМР для трехслойной структуры. Добавление второго слоя пьезоэлектрика с противоположным направлением магнитострикции дает больший изгиб образца. На графике видно, что максимальное уширение линии ФМР 150 Э наблюдается при отношении толщин слоев феррита никеля и ЦТС, равном 1,7.

3. Моделирование влияния МЭ эффекта на уширение линии ФМР для пятислойной структуры. Добавление двух буферных слоев между ферритом и пьезоэлектриками уменьшило влияние пьезоэлектриков на структуру СВЧ поля в феррите. На графике видно, что максимальное уширение линии ФМР 145 Э наблюдается при отношении толщин слоев феррита никеля и ЦТС, равном 1,5.

На основе полученных данных есть возможность для конструирования СВЧ-фильтров с управляемой полосой пропускания.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда (грант № 16-12-10158).*

1. Petrov V.M., Bichurin M.I., Saplev A.F., Tatarenko A.S., Lobekin V.N. Electric field induced broadening of magnetic resonance line in ferrite/piezoelectric bilayer. Journal of Applied Physics, 2017, vol. 121, p. 224103.
2. Bichurin M.I., Kornev I.A., Petrov V.M., Tatarenko A.S., Kiliba Yu.V., Srinivasan G. Theory of magnetoelectric effects at microwave frequencies in a piezoelectric/magnetostrictive multilayer composite. Physical Review B, 2001, v.64, p.094409.
3. Bichurin M.I., Petrov V.M. Modeling of magnetoelectric effects in composites. Springer Series in Materials Science. Vol. 201. Springer, New York, 2014. 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, v.45, p.30801.