

05

## **Резонансное магнитоэлектрическое взаимодействие в несимметричной биморфной структуре ферромагнетик—сегнетоэлектрик**

© Н.С. Перов, Л.Ю. Фетисов, Ю.К. Фетисов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
Московский государственный институт радиотехники, электроники  
и автоматики (технический университет)  
E-mail: fetisov1@yandex.ru

Поступило в Редакцию 6 июля 2010 г.

Экспериментально исследовано магнитоэлектрическое (МЭ) взаимодействие в планарной несимметричной структуре, содержащей биморфную пластину из цирконата-титаната свинца, расположенную между ферромагнитными слоями из аморфного магнетика и никеля с разными знаками магнитострикции. За счет эффективного возбуждения изгибных колебаний на резонансной частоте  $\sim 5$  КHz получен коэффициент МЭ-взаимодействия  $18 \text{ V} \cdot \text{Oe}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ .

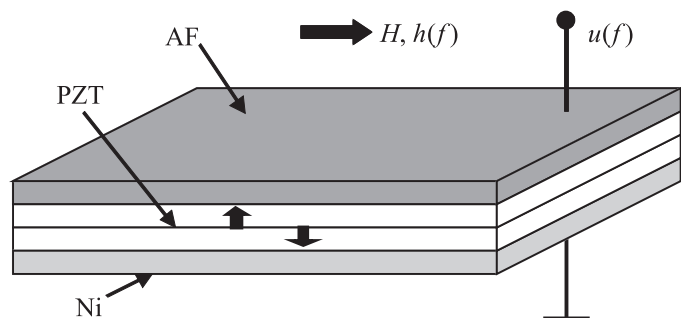
Магнитоэлектрическое (МЭ) взаимодействие в планарных структурах ферромагнетик—сегнетоэлектрик (ФМ—СЭ) интенсивно изучают в последние годы в связи с перспективами использования для создания датчиков магнитных полей, преобразователей и генераторов электрического напряжения [1]. Взаимодействие приводит к генерации напряжения  $u(f)$  на гранях структуры под действием переменного магнитного поля  $h(f)$  и возникает в результате комбинации магнитострикции в слое ФМ и пьезоэффекта в слое СЭ посредством механической связи между слоями. Эффективность МЭ-взаимодействия характеризует

коэффициент  $\alpha_E = (u/b)/h$ , где  $b$  — толщина структуры. Амплитуда напряжения  $u$  резонансно возрастает при совпадении частоты поля  $f$  с частотами акустических колебаний структуры из-за увеличения деформаций в слое СЭ [2]. Резонанс возможен на частотах изгибных и планарных колебаний структуры, причем использование изгибных колебаний позволяет на один-два порядка понизить частоту либо при той же частоте уменьшить размеры структуры.

Для двухслойной структуры, содержащей пластину сплава Terfenol с высокой магнитострикцией и пластину цирконата-титаната свинца (PZT) на частоте изгибных колебаний 12.5 KHz, получен коэффициент  $\alpha_E = 14.6 \text{ V} \cdot \text{Oe}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  [3], для структуры Ni-PZT в диапазоне частот 3–7 KHz достигнут коэффициент  $\sim 1 \text{ V} \cdot \text{Oe}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  [4], а для структуры GaFe-PZT на частоте колебаний 33.4 kHz коэффициент равнялся  $\sim 8.7 \text{ V} \cdot \text{Oe}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  [5]. Отметим, что при изгибных колебаниях структур с одним СЭ-слоем смена знака деформаций по толщине слоя ограничивает напряжение [6]. Увеличить  $u$  удалось [7], используя симметричную биморфную структуру с двумя слоями PZT, расположенными между одинаковыми слоями ФМ из терфенола: на частоте 34 kHz коэффициент равнялся  $\alpha_E \sim 80 \text{ V} \cdot \text{Oe}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Однако для возбуждения в симметричной структуре изгибных колебаний необходимо намагнитить слои ФМ в противоположных направлениях, что реализовано с помощью сложной и неперестраиваемой магнитной системы.

В данной работе исследовано резонансное МЭ-взаимодействие в несимметричной биморфной структуре, содержащей два поляризованных навстречу друг другу слоя PZT, расположенные между двумя магнитными слоями из материалов с разными знаками магнитострикции. В такой структуре изгибные колебания возбуждаются при однородном поле подмагничивания, что обеспечивает высокую эффективность МЭ-взаимодействия.

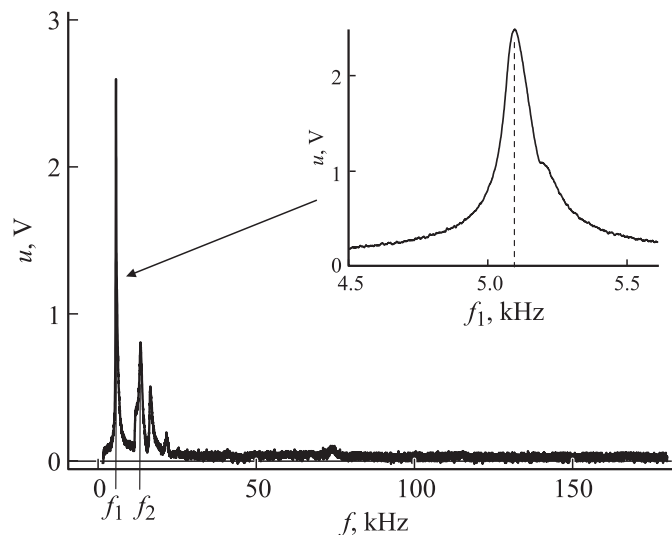
Несимметричная структура ФМ–СЭ схематично изображена на рис. 1. Она содержит два слоя СЭ с проводящими электродами, поляризованными в противоположных направлениях и расположенными между слоями из материалов ФМ с разными знаками магнитострикции. Внешнее поле  $H$  направлено параллельно плоскости структуры. В экспериментах использовали пластины СЭ из керамики PZT ( $\text{Pb}_{0.52}\text{Zr}_{0.48}\text{TiO}_3$ ) с пьезомодулем  $d_{13} = 175 \text{ pC/N}$ , размерами  $8 \times 14 \text{ mm}$  и толщиной  $100 \mu\text{m}$  с Ag-электродами толщиной  $\sim 3 \mu\text{m}$ . Одна магнитная пластина была изготовлена из аморфного магнитного сплава (AF)



**Рис. 1.** Несимметричная биморфная структура ФМ–СЭ. Стрелки указывают направление магнитного поля и направления поляризации слоев СЭ.

состава  $\text{Fe}_{90.3}\text{Ni}_{1.5}\text{Si}_{5.2}\text{B}_3$  с положительной продольной магнитострикцией насыщения  $\lambda_1^{\text{AF}} = 33 \cdot 10^{-6}$ , она имела размеры  $5 \times 10 \text{ mm}$  и толщину  $3 \mu\text{m}$ . Вторая магнитная пластина была изготовлена из никеля (Ni) с отрицательной магнитострикцией насыщения  $\lambda_{11}^{\text{Ni}} = -30 \cdot 10^{-6}$ , она имела размеры  $5 \times 10 \text{ mm}$  и толщину  $35 \mu\text{m}$ . Пластины были соединены проводящим эпоксидным клеем, толщины слоев клея не превышали  $3 \mu\text{m}$ . После изготовления структуры слои PZT были поляризованы в противоположных направлениях путем нагрева до  $100^\circ\text{C}$  и приложения к электродам постоянного напряжения  $500 \text{ V}$ . Структуру помещали между полюсами электромагнита в постоянное касательное поле  $H = 0-2 \text{ kOe}$ . Модулирующее поле  $h \cos(2\pi ft)$  с амплитудой до  $h = 7 \text{ Oe}$  и частотой  $f = 10 \text{ Hz}-200 \text{ kHz}$ , параллельное  $H$ , создавали с помощью катушек, подключенных к генератору. Регистрировали амплитуду  $u$  переменного напряжения с внешних электродов структуры при изменении полей  $H$  и  $h$  и частоты поля  $f$ .

На рис. 2 показана зависимость амплитуды  $u$  генерируемого структурой напряжения от частоты  $f$  переменного поля при  $H = 120 \text{ Oe}$  и  $h = 7 \text{ Oe}$ . В области частот от нуля до  $30 \text{ kHz}$  видны резонансные пики с частотами  $f_1 = 5.12 \text{ kHz}$  и  $f_2 = 12.9 \text{ kHz}$ , добротностями  $Q_1 = 61$  и  $Q_2 = 30$  и амплитудами  $u_1 = 2.54 \text{ V}$  и  $u_2 = 0.78 \text{ V}$  соответственно. В области более высоких частот, до  $200 \text{ kHz}$ , дополнительных пиков не наблюдали. Резонансное увеличение МЭ-напряжения на отдельных частотах связано с возбуждением в структуре изгибных колебаний. Эффективность МЭ-взаимодействия составляла

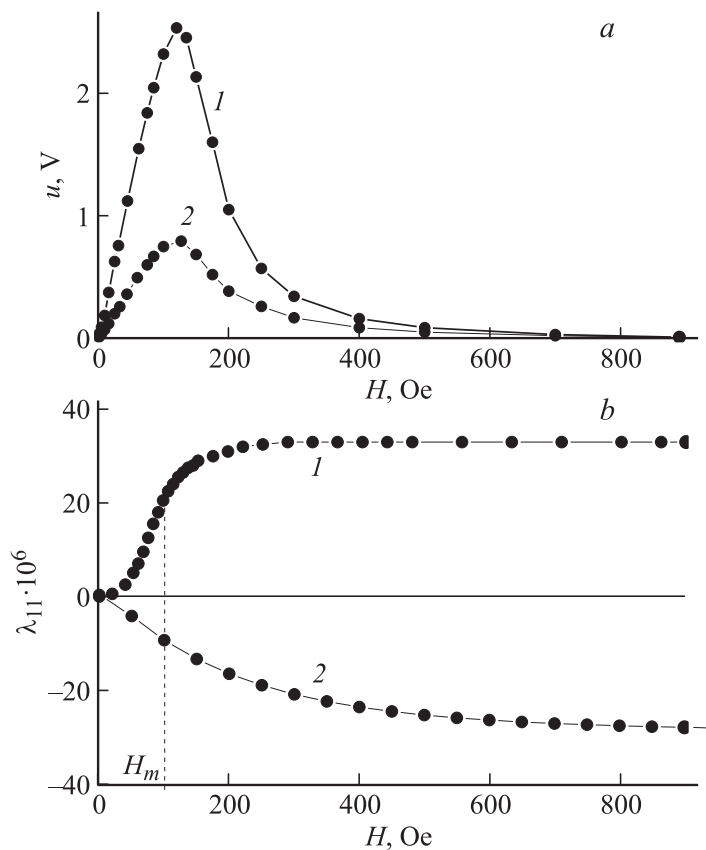


**Рис. 2.** Зависимость генерируемого структурой ФМ–СЭ напряжения от частоты  $f$  магнитного поля при  $H = 120$  Ое и  $h = 7$  Ое. На вставке показана форма линии основного резонанса.

$\alpha_{E0} \approx 0.7 \text{ V} \cdot \text{Oe}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  в нерезонансных условиях на частоте 10 kHz и возросла до  $\alpha_{E1} \approx 18 \text{ V} \cdot \text{Oe}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  на частоте основной моды изгибных колебаний структуры. Это на порядок выше эффективности МЭ-взаимодействия в двухслойных структурах Ni–PZT с аналогичными параметрами и сравнимыми размерами [4].

На рис. 3, *a* приведены зависимости амплитуды  $u$  и напряжения от постоянного поля  $H$ , измеренные на частотах резонансов  $f_1$  и  $f_2$ . Для обоих резонансов в малых полях амплитуда растет примерно линейно с  $H$  и достигает максимума при поле  $H_m \sim 120$  Ое. При насыщении магнитных слоев (в полях свыше 800 Ое) амплитуды обоих резонансов падают до нуля.

Для объяснения данных рассмотрим особенности МЭ-взаимодействия в несимметричной биморфной структуре. На рис. 3, *b* приведены зависимости продольной ( $\lambda_{11}$ ) магнитострикции сплава AF и Ni, измеренные для касательно намагниченных пленок с помощью тензодатчика [8]. Поперечную магнитострикцию  $\lambda_{12}$ , которая суще-



**Рис. 3.** Зависимости: *a* — генерируемого структурой ФМ–СЭ напряжения  $u$  от магнитного поля  $H$  на частотах  $f_1$  (1) и  $f_2$  (2) при  $h = 7$  Ое; *b* — продольной магнитострикции  $\lambda_{11}$  пленки аморфного сплава (1) и никеля (2) от магнитного поля  $H$ .

ственно меньше по величине, учитывать не будем. При приложении поля  $H$  пленка AF растягивается ( $\lambda_{11}^{AF} > 0$ ), а пленка Ni сжимается ( $\lambda_{11}^{Ni} < 0$ ) в направлении поля. Магнитные материалы специально выбраны таким образом, что для них величина магнитострикции насыщения примерно одинакова  $|\lambda_{11}| \approx 30 \cdot 10^{-6}$  и пьезомагнитные коэффициенты

( $q_{11} = \partial\lambda_{11}/\partial H$ ) достигают максимума примерно в одном и том же поле  $H_m \sim 10^2$  Ое (вертикальная штриховая линия на рис. 3, *b*). Это означает, что под действием поля  $H$  изображенная на рис. 1 биморфная структура будет изгибаться слоем АФ наружу. При приложении к структуре переменного поля  $h(f)$  малой амплитуды в ней будут эффективно возбуждаться изгибные колебания. Амплитуда колебаний достигает максимума при поле смещения  $H_m \sim 10^2$  Ое. Изгиб структуры приводит к сжатию одного слоя PZT и растяжению другого слоя. Так как слои PZT поляризованы в противоположных направлениях, то напряжения, генерируемые на электродах каждого слоя при изгибных колебаниях, складываются. При возбуждении в биморфной структуре планарных колебаний деформации обоих слоев PZT имеют одинаковый знак, а генерируемые ими напряжения — противоположные знаки. Это приводит к уменьшению практически до нуля МЭ-напряжения на частотах планарных колебаний, что и видно из рис. 2. Описанная структура, как и в [7], обеспечивает также подавление тепловых флуктуаций напряжения.

Оценим частоту резонансного МЭ-взаимодействия, используя формулу для частоты низшей моды изгибных колебаний свободной пластины квадратной формы с стороной „ $a$ “ и толщиной „ $b$ “ [9]

$$f_1 = \frac{\beta_1 b}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{Y}{12\rho(1-\gamma^2)}},$$

где обозначено:  $\beta_1 = 14.1$  — коэффициент,  $Y$  — модуль Юнга,  $\rho$  — плотность,  $\gamma$  — коэффициент Пуассона. Для неоднородной по толщине пластины необходимо использовать эффективные значения  $Y$  и  $\rho$ , которые рассчитываются с учетом толщины и размеров слоев [4,8]. Используя параметры слоев (PZT:  $Y_p = 7 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\rho_p = 7.7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; АФ:  $Y_a = 18.6 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\rho_a = 8.2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; Ni:  $Y_N = 21.5 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\rho_N = 8.9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) и известные толщины слоев, принимая  $\gamma \approx 0.35$  и сторону квадрата  $a = \sqrt{8} \cdot 14 \approx 10.6$  мм, получаем частоту низшей моды изгибных колебаний  $f_1 = 5.9$  кГц. Для частоты низшей моды планарных колебаний аналогичная оценка дает  $\sim 120$  кГц. Рассчитанное значение частоты  $f_1$  хорошо совпадает с измеренным, что подтверждает МЭ-взаимодействие при возбуждении изгибных колебаний в структуре.

Таким образом, исследован МЭ-эффект в планарной несимметричной биморфной ФМ–СЭ-структуре. Использование ФМ-слоев с разными знаками магнитострикции обеспечивает эффективное возбуждение

изгибных колебаний структуры, а применение биморфного СЭ-слоя позволяет увеличить амплитуду генерируемого напряжения и подавление напряжения на частотах планарных колебаний. Эффективность МЭ-взаимодействия в описанной структуре равна  $\alpha_E \sim 18 \text{ V} \cdot \text{Oe}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ , что на порядок превышает эффективность взаимодействия в двухслойных структурах такого же состава с аналогичными параметрами.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 2.11.6650) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 09-02-12439 офи\_м).

## Список литературы

- [1] *Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong C. et al. // JAP. 2008. V. 103. P. 031101.*
- [2] *Bichurin M.I., Filippov D.A., Petrov V.M. et al. // Phys. Rev. 2003. V. B68. Pap. 132408.*
- [3] *Wan J.W., Li Z.Y., Wang Y. et al. // APL. 2005. V. 86. Pap. 202504.*
- [4] *Chashin D.V., Fetisov Y.K., Kamentsev K.E., Srinivasan G. // APL2008. V. 92. Pap. 102511.*
- [5] *Буш А.А., Каменцев К.Е., Мецзяков В.Ф. и др. // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 9. С. 71–77.*
- [6] *Petrov V.M., Srinivasan G., Bichurin M.I., Galkina T.A. // JAP. 2009. V. 105. Pap. 063911.*
- [7] *Zhai J., Xing Z., Dong S. et al. // APL. 2008. V. 93. Pap. 072906.*
- [8] *Fetisov Y.K., Petrov V.M., Srinivasan G. // J. Mater. Res. 2007. V. 22. Pap. 2074.*
- [9] *Timoshenko S. // Vibration Problems in Solids Toronto: D. Van Nostrand, 1955.*