

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 ~ 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)

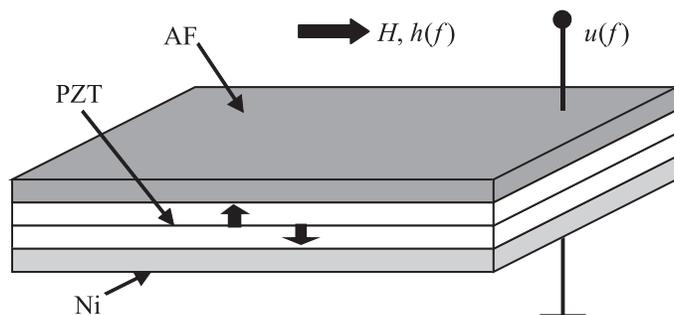


Рис. 1. Несимметричная биморфная структура ФМ–СЭ. Стрелки указывают направление магнитного поля и направления поляризации слоев СЭ.

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°C и приложения к электродам постоянного напряжения 500 V . Структуру помещали между полюсами электромагнита в постоянное касательное поле $H = 0\text{--}2 \text{ kOe}$. Модулирующее поле $h \cos(2\pi ft)$ с амплитудой до $h = 7 \text{ Oe}$ и частотой $f = 10 \text{ Hz}\text{--}200 \text{ kHz}$, 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 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 kHz , дополнительных пиков не наблюдали. Резонансное увеличение МЭ-напряжения на отдельных частотах связано с возбуждением в структуре изгибных колебаний. Эффективность МЭ-взаимодействия составляла

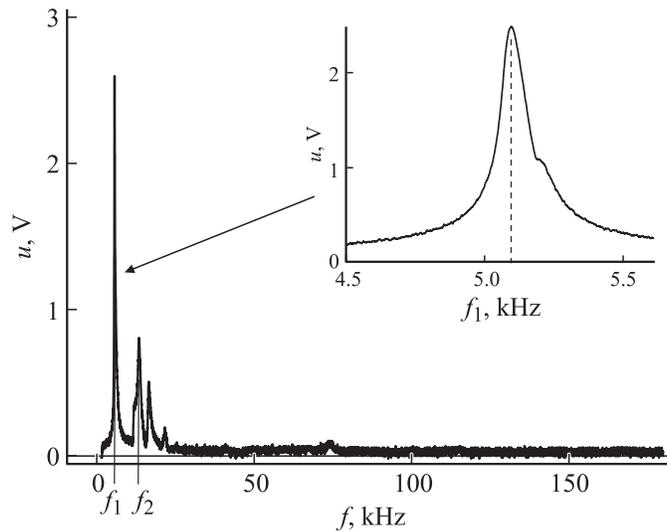


Рис. 2. Зависимость генерируемого структурой ФМ–СЭ напряжения от частоты f магнитного поля при $H = 120$ Ое и $h = 7$ Ое. На вставке показана форма линии основного резонанса.

$\alpha_{E0} \approx 0.7 \text{ V} \cdot \text{Oe}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 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 (λ_{11}) магнитострикции сплава AF и Ni, измеренные для касательно намагниченных пленок с помощью тензодатчика [8]. Поперечную магнитострикцию λ_{12} , которая суще-

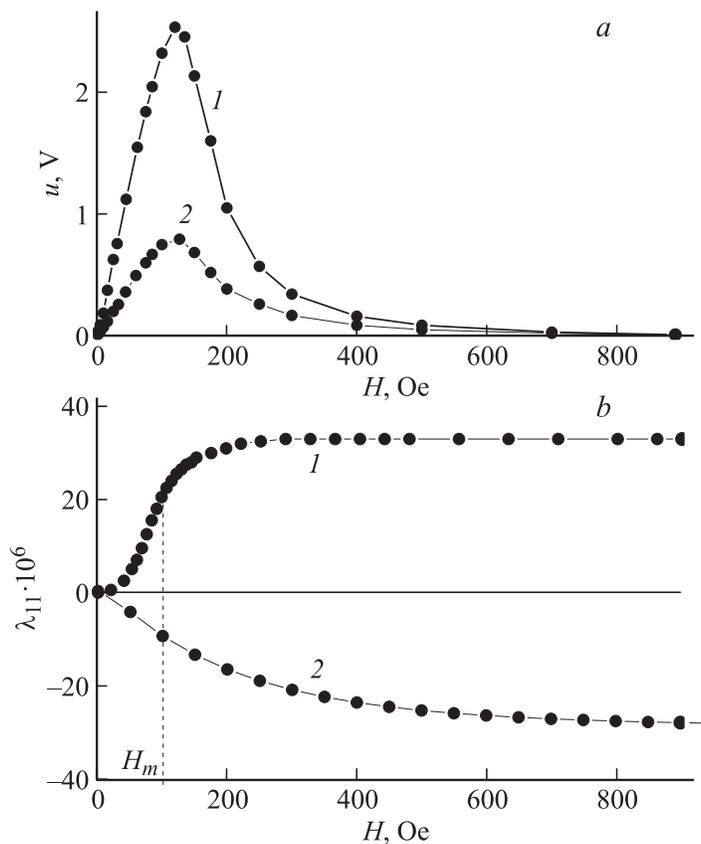


Рис. 3. Зависимости: *a* — генерируемого структурой ФМ–СЭ напряжения u от магнитного поля H на частотах f_1 (1) и f_2 (2) при $h = 7$ Ое; *b* — продольной магнитострикции λ_{11} пленки аморфного сплава (1) и никеля (2) от магнитного поля H .

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, ρ — плотность, γ — коэффициент Пуассона. Для неоднородной по толщине пластины необходимо использовать эффективные значения Y и ρ , которые рассчитываются с учетом толщины и размеров слоев [4,8]. Используя параметры слоев (PZT: $Y_p = 7 \cdot 10^{10}$ Н/м², $\rho_p = 7.7 \cdot 10^3$ кг/м³; АФ: $Y_a = 18.6 \cdot 10^{10}$ Н/м², $\rho_a = 8.2 \cdot 10^3$ кг/м³; Ni: $Y_N = 21.5 \cdot 10^{10}$ Н/м², $\rho_N = 8.9 \cdot 10^3$ кг/м³) 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 ~ 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.