

НЕЛИНЕЙНЫЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ГИБКОЙ КОМПОЗИТНОЙ СТРУКТУРЕ

© 2016 г. Л.Ю. ФЕТИСОВ, И.А. БАРАБАН*, Ю.К. ФЕТИСОВ, В.В. РОДИОНОВА*

Московский технологический университет (МИРЭА),
*Балтийский федеральный университет им. Канта, г. Калининград
e-mail: irinmachay@gmail.com, fetisovl@yandex.ru

Введение

Магнитоэлектрический эффект (МЭ) проявляется в электрической поляризации образца при помещении его во внешнее магнитное поле. Наибольший по величине эффект наблюдается в различных композитных структурах состоящих из ферромагнитной (ФМ) и пьезоэлектрической (ПЭ) фаз [1]. В слоистых композитных структурах МЭ эффект возникает в результате комбинации магнитострикции ФМ слоя и пьезоэффекта в ПЭ слое вследствие механической связи между слоями [2]. В качестве пьезоэлектрика чаще всего используют различные керамики (например, цирконат-титанат свинца - ЦТС), либо кристаллические пьезоэлектрики (лангасит, лангасит), а в качестве магнитного слоя – металлы и их сплавы (Ni, FeNi, Co, FeCo), в том числе аморфные сплавы (FeSiCB). Недостатком таких структур является их хрупкость и недостаточная гибкость, что ограничивает возможности их применения и уменьшает эффективность МЭ взаимодействия.

В последние годы было предложено использовать пьезоэлектрические слои из пьезополимеров, например, из поливинилиденфторида (ПВДФ), которые свободны от данного недостатка. Экспериментально показано, что МЭ эффект в структурах с пьезополимерами может быть больше, чем в структурах с керамикой [2,3]. Известно, что зависимость магнитострикции от поля имеет нелинейный вид, также как и зависимость пьезоэффекта от напряжения, что может приводить к различным нелинейным эффектам. Нелинейные взаимодействия в композитных структурах представляют большой интерес, как с научной точки зрения, так и для различных приложений. В структурах на основе ПЭ керамики обнаружены МЭ эффекты удвоения частоты, нелинейного смешения частот переменных магнитных полей и т.д. [4,5]. В данной работе впервые обнаружены и исследованы нелинейные эффекты в гибких слоистых композитных структурах на основе пьезополимера ПВДФ и аморфного магнитного сплава на основе железа.

Образцы и методики

Измерения проводили на двухслойной структуре ПВДФ-аморфный сплав. Размеры ПВДФ слоя (TE connectivity Ltd.) составляли: $10 \times 14 \text{ мм}^2$, толщина 28 мкм. Размеры и толщина ленты из аморфного сплава (Metglas Inc.): $11 \times 14 \text{ мм}^2$ и 27 мкм, соответственно. Слои были механически соединены друг с другом при помощи эпоксидного клея Loctite. Образец помещали в постоянное магнитное поле H напряженностью до 100 Э и переменное поле $h \cdot \cos(2\pi ft)$ с амплитудой до 10 Э и частотой $f = 10 \text{ Гц} - 2 \text{ кГц}$. Магнитные поля были направлены параллельно друг другу в плоскости образца вдоль длинной стороны. Под действием переменного поля в структуре возбуждались изгибные колебания, что приводило к генерации МЭ напряжения u между электродами ПЭ слоя, которое измеряли при помощи осциллографа.

Результаты

На первом этапе были исследованы линейные характеристики МЭ эффекта в описанной структуре. Структуру возбуждали переменным магнитным полем с частотой $f = 200$ Гц малой амплитуды $h = 1$ Э. Результаты показаны на рис. 1, а и рис. 1, б. Видно, что в спектре генерируемого напряжения есть составляющая только с частотой, равной частоте возбуждающего магнитного поля. МЭ коэффициент, характеризующий величину эффекта, равнялся на данной частоте $\alpha_1 = U/(hb) \sim 0,57 \text{ В} \cdot \text{Э}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

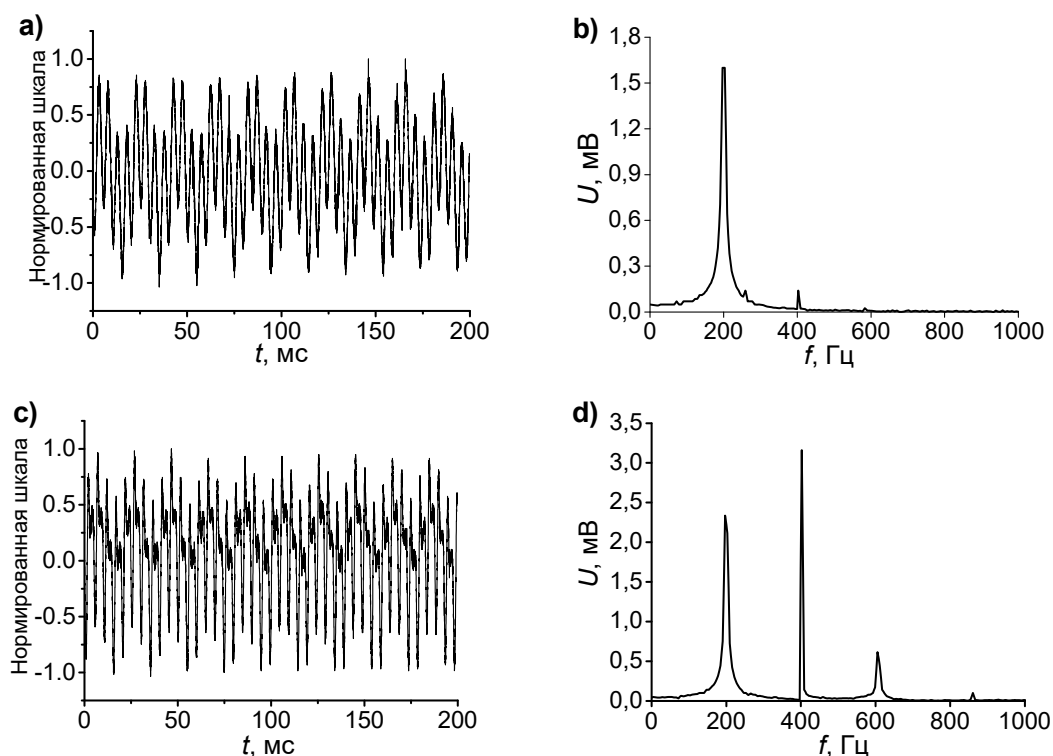


Рис. 1. а) Осциллограмма (а) и спектр частот (б) напряжения, генерируемого МЭ структурой в линейном режиме при $h = 1$ Э и $H = 12$ Э; осциллограмма (с) и спектр частот (д) напряжения, генерируемого МЭ структурой в нелинейном режиме $h = 6$ Э и $H = 5$ Э.

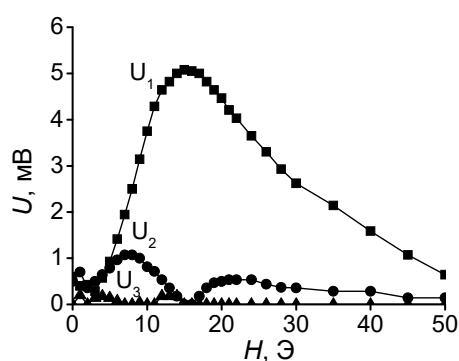


Рис. 2. Зависимости амплитуд 1, 2 и 3-й гармоник МЭ напряжения от H при $h = 4$ Э, $f = 200$ Гц.

Затем были измерены зависимости амплитуд гармоник от напряженности постоянного H и амплитуды h переменного магнитного поля при частоте возбуждающего поля $f = 200$ Гц. Из рис. 2 видно, что амплитуда 1-ой гармоники достигает максимума $U_1 \sim 5.5$ мВ в поле $H \sim 16$ Э, соответствующем максимуму пьезомагнитного коэффициента ($q = \partial \lambda / \partial H$) аморфного сплава. Вторая гармоника имела два максимума в полях

На рис. 1, с и рис. 1, д приведены аналогичны огибающая и спектр частот генерируемого напряжения при возбуждении МЭ структуры полем большой амплитуды $h = 6$ Э. Видно, что в спектре из-за нелинейности магнитострикции появились 2-я и 3-я гармоники с частотами 400 Гц и 600 Гц. Амплитуда 2-ой гармоники в $\sim 1,5$ раза больше амплитуды 1-ой и на порядок больше амплитуды 3-ей гармоники. Величины коэффициентов МЭ преобразования для гармоник составляли, соответственно: $\alpha_1 \sim 0.14 \text{ В} \cdot \text{Э}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, $\alpha_2 \sim 0.19 \text{ В} \cdot \text{Э}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, $\alpha_3 \sim 0.03 \text{ В} \cdot \text{Э}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

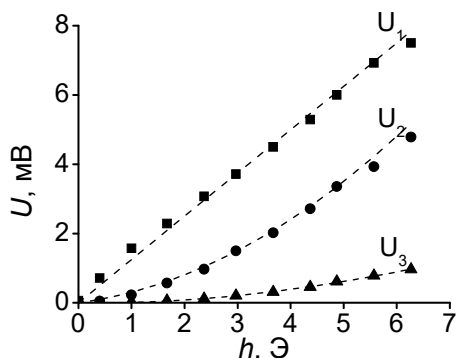


Рис. 3. Зависимости амплитуд гармоник U_1 (при $H=12$ Э), U_2 (при $H=5$ Э) и U_3 (при $H=2$ Э) от амплитуды поля h . Штриховые линии - аппроксимация экспериментальных данных.

тот двух переменных магнитных полей. Для этого образец подвергали одновременно воздействию двух переменных полей с частотами 200 Гц и 300 Гц. На рис. 4, а и б приведены спектры частот генерируемого МЭ сигнала при возбуждении структуры сначала одним полем, а затем другим. На обоих рисунках помимо основных гармоник видны дополнительные пики с удвоенными частотами 400 Гц и 600 Гц, соответствующие возбуждению вторых гармоник. Причем во втором случае амплитуда второй гармоники была больше чем амплитуда первой. На рис. 4, с приведен спектр частот МЭ напряжения при одновременном возбуждении структуры двумя переменными полями. Помимо сигналов первой и второй гармоник на частотах 200, 300, 400 и 600 Гц, наблюдаются пики на частотах 100 Гц и 500 Гц, соответствующие сигналам с суммарной и разностной частотами:

$$f_+ = f_1 + f_2 \text{ и } f_- = f_1 - f_2.$$

Амплитуды этих пиков совпадали, достигали значений $\sim 3,3$ мВ и превышали амплитуды остальных пиков. Величины МЭ коэффициентов на этих частотах составляли $\alpha_+ = \alpha_- \sim 0,17 \text{ В} \cdot \text{Э}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

Для суммарной и разностной частот были измерены зависимости МЭ напряжения от амплитуды магнитного поля. Измерения проводили следующим образом. Фиксировали амплитуду одного из возбуждающих магнитных полей h_2 , а амплитуду второго изменяли в диапазоне 0 - 7 Э. На рис. 5, а приведена зависимость МЭ напряжения, генерируемого структурой на частоте $f = 100$ Гц при трёх фиксированных значениях поля $h_2 = 1, 3$ и 5 Э, от амплитуды поля h_1 . Видно, что с ростом поля h_2 растет величина генерируемого напряжения. Кроме того, в случае $h_2 = 5$ Э напряжение растет практически от нуля, в то время как в случае поля $h_2 = 1$ Э рост напряжения начинается лишь в поле $h_1 \sim 4$ Э. Аналогичные измерения провели для частоты $f_+ = 500$ Гц. В этом случае рост напряжения наблюдали от нуля для всех трех кривых, однако, с разной скоростью. Самый быстрый рост наблюдали для кривой (3), а медленный – для (1). Кроме

~ 7 Э и ~ 22 Э. Третья гармоника также имела два максимума амплитудой не более 0.3 мВ в полях ~ 2 Э и ~ 13 Э.

На рис. 3 приведены измеренные зависимости амплитуд гармоник от амплитуды возбуждающего поля h при постоянных полях H , соответствующих максимуму каждой из гармоник. Видно, что, в соответствии с предсказанием теории [5,6], амплитуда первой гармоники линейно растет с увеличением поля $U_1 \sim h$, амплитуда второй – квадратично $U_2 \sim h^2$, и третья имеет кубическую зависимость $U_3 \sim h^3$.

На данном образце было исследовано также нелинейное смешение частот

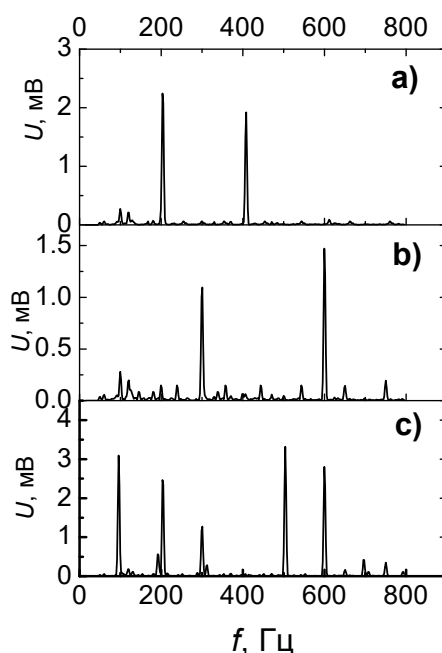


Рис. 4. Демонстрация смешения частот магнитных полей в структуре ФМ-ПЭ. а) Спектр частот МЭ напряжения при возбуждении структуры полем с $f_1 = 200$ Гц; б) Спектр частот при возбуждении структуры полем с $f_2 = 300$ Гц; в) Спектр частот при возбуждении структуры двумя полями с $f_1 = 200$ Гц и $f_2 = 300$ Гц.

того, максимальное значение напряжения, полученное в поле 5 Э для частоты 500 Гц, составляло ~ 4 мВ, что больше соответствующего значения для частоты 100 Гц.

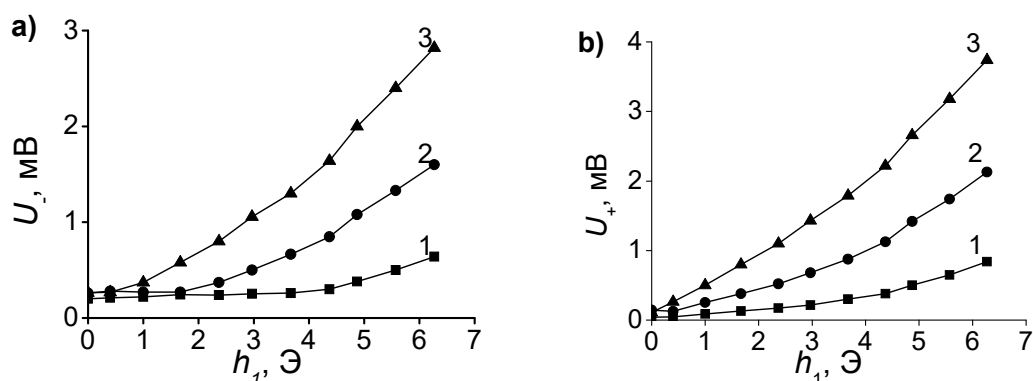


Рис. 5. Полевые зависимости МЭ напряжения при смешении частот: а) $U_-(f_1 - f_2) = 100$ Гц, б) $U_+(f_1 + f_2) = 500$ Гц при различных h_2 , Э: 1 - 1 Э, 2 - 3 Э и 3 - 5 Э.

Таким образом, в работе впервые обнаружены и исследованы нелинейные магнитоэлектрические эффекты в композитной слоистой структуре на основе пьезоэлектрического полимера ПВДФ. Продемонстрировано возбуждение в структуре 1-й, 2-й и 3-й гармоник и показано, что амплитуда второй гармоники может превышать амплитуду 1-ой гармоники. Обнаружен эффект нелинейного смешения двух переменных магнитных полей с частотами 200 Гц и 300 Гц. Исследованы характеристики генерируемого напряжения на суммарной и разностной частотах. Полученные экспериментальные зависимости соответствуют теоретическим расчётам.

Исследования поддержаны Министерством образования и науки Российской Федерации (грант № МК-7690.2016.9, проект № 2.76.2014К) и Российским Фондом Фундаментальных Исследований (грант № 16-32-50095\16).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., and Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions // Journal of Applied Physics. 2008. v. 103. № 031101.
2. Martins P. and Lanceros-Mendes S. Polymer-based magnetoelectric materials // Advanced Functional Materials. – 2013. v. 23. p. 3371-3385.
3. Dong X.W., Wang B., Wang K.F., Wan J.G., and Liu J.-M. Ultra-sensitive detection of magnetic field and its direction using bilayer PVDF/Metglas laminate // Sensors and Actuators A. – 2009. v. 153. p. 64 - 68.
4. Burdin D.A., Chashin D.V., Ekonomov N.A., Fetisov Y.K., Fetisov L.Y., Sreenivasulu G., and Srinivasan G. Resonance mixing of alternating current magnetic fields in a multiferroic composite // Journal of Applied Physics. – 2013. V. 113. № 033902.
5. Fetisov L.Y., Fetisov Y.K., Sreenivasulu, and Srinivasan G. Nonlinear resonant magnetoelectric interactions and efficient frequency doubling in a ferromagnetic-ferroelectric layered structure // Journal of Applied Physics. – 2013. V. 113. № 116101.