

05

## **Влияние температуры на характеристики резонансного магнитоэлектрического эффекта в структуре магниониобат—титанат свинца—никель**

© Д.А. Бурдин, Ю.К. Фетисов, Д.В. Чашин, Н.А. Экономов

Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики  
E-mail: fetisov@mirea.ru

Поступило в Редакцию 12 марта 2012 г.

Экспериментально исследованы температурные зависимости характеристик резонансного магнитоэлектрического взаимодействия в композитной планарной структуре, состоящей из слоя сегнетоэлектрического магниониобата—титаната свинца и слоя никеля. Обнаружено, что увеличение температуры в интервале 220–340 К приводит к уменьшению резонансной частоты и эффективности взаимодействия. Результаты могут найти применение при разработке методов термостабилизации магнитоэлектрических устройств.

Магнитоэлектрический (МЭ) эффект в планарных композитных структурах, содержащих ферромагнитные (ФМ) и пьезоэлектрические (ПЭ) слои, перспективен для создания высокочувствительных датчиков магнитных полей, генераторов электрической энергии и управляемых электрическим полем устройств обработки сигналов [1,2]. Эффект проявляется в виде генерации переменного электрического напряжения  $u(f)$  на обкладках пьезоэлектрика при воздействии на образец переменного магнитного поля  $h(f)$ . Эффект возникает в результате комбинации магнитострикции ФМ-слоя структуры и пьезоэффекта в ПЭ-слое благодаря механической связи между ними. При совпадении частоты возбуждающего магнитного поля  $f$  с частотой резонанса акустических колебаний образца амплитуда напряжения  $u$  возрастает на один-два порядка из-за резонансного увеличения механических деформаций в пьезоэлектрике [3].

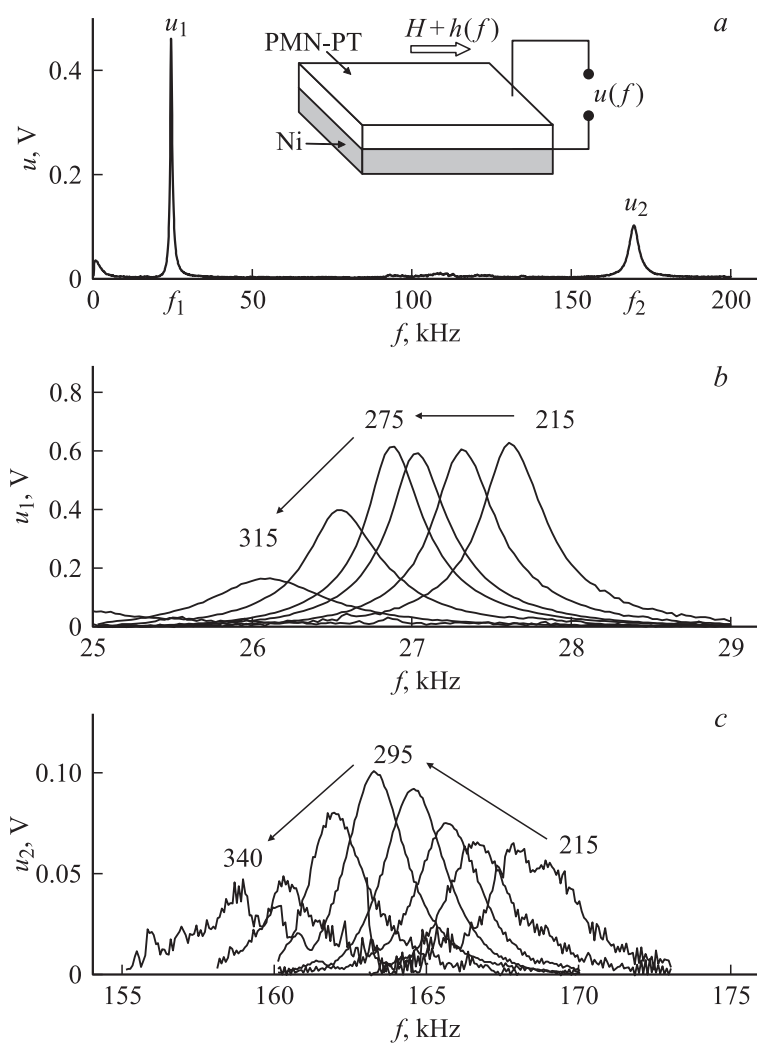
Величина МЭ-эффекта, характеризуемая коэффициентом  $\alpha_E = u/(hb)$  (где  $b$  — толщина образца), зависит от свойств материалов

ФМ- и ПЭ-слоев, напряженности и взаимной ориентации действующих на образец постоянных и переменных магнитных и электрических полей. Необходимо отметить, что до настоящего времени исследований влияния температуры на характеристики резонансного МЭ-эффекта не проводилось. Вместе с тем этот аспект важен как для понимания физики МЭ-взаимодействий, поскольку параметры ФМ- и ПЭ-слоев зависят от температуры, так и для обеспечения термостабилизации различных устройств, использующих МЭ-эффект.

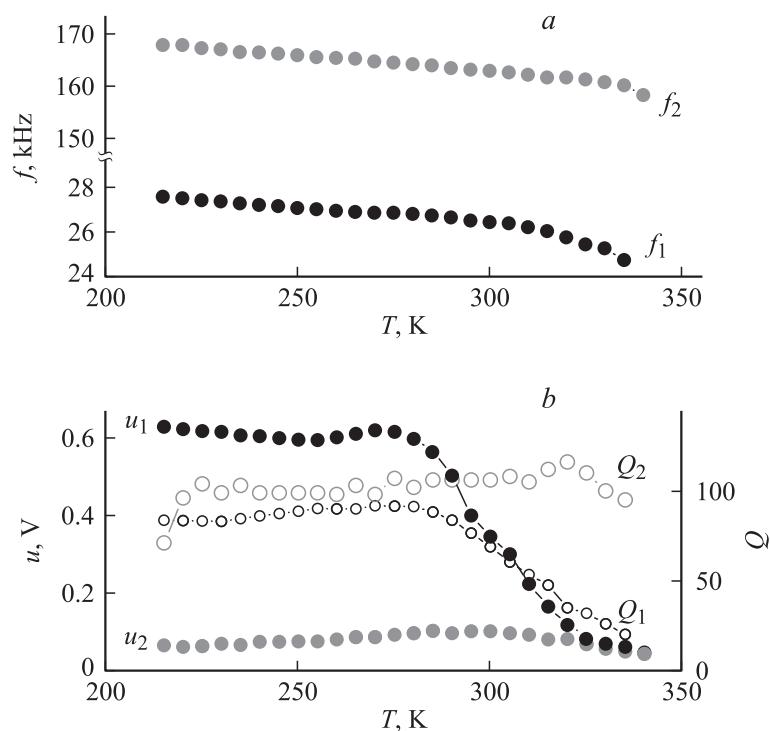
В представленной работе впервые экспериментально исследовано влияние температуры на частотные характеристики и эффективность МЭ-взаимодействия в двухслойной композитной структуре. Образец содержал монокристаллическую пластину сегнетоэлектрика магнийниобата–титана свинца (PMN-PT) состава  $0.7\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.3\text{PbTiO}_3$  размерами  $10 \times 4 \text{ mm}$  и толщиной  $b_p = 0.5 \text{ mm}$  с Au-электродами толщиной  $\sim 0.2 \mu\text{m}$  и пластину электролитически чистого Ni тех же размеров толщиной  $b_m = 0.2 \text{ mm}$ , механически соединенные с помощью эпоксидного клея. Пластина PMN–PT была предварительно поляризована перпендикулярно к плоскости и имела пьезомодуль  $d_{31} \approx -600 \text{ pC/m}$ . Магнитострикция насыщения Ni, измеренная с помощью тензодатчика, достигала  $\lambda_{11} = -30 \cdot 10^{-6}$  при касательном намагничивании в поле  $H_s \approx 0.5 \text{ kOe}$ .

Образец помещали в тефлоновую ячейку и прикладывали к нему постоянное магнитное поле  $H = 0-2 \text{ kOe}$  и параллельное ему переменное магнитное поле  $h \cos(2\pi ft)$  с частотой  $f = 10 \text{ Hz}$  и амплитудой до  $h = 1.2 \text{ Oe}$ , направленные в плоскости вдоль длинной стороны образца (рис. 1). Нагрев и охлаждение образца в интервале температур  $220-360 \text{ K}$  проводили в потоке газообразного азота, который пропускали через ячейку. Температуру образца  $T$  измеряли термодатчиком AD590 с точностью  $\sim 1 \text{ K}$ . С помощью цифрового осциллографа регистрировали зависимости генерируемого образцом  $u(f)$  от частоты возбуждающего поля при различных  $T$ . По полученным файлам данных определяли частоты и коэффициенты эффективности резонансного МЭ-взаимодействия. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(T)$  и параметра диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta(T)$  измеряли с помощью RLC-измерителя АМ-3026.

На рис. 1, а показана зависимость амплитуды генерируемого образцом переменного напряжения  $u$  от частоты магнитного поля  $f$  при комнатной температуре  $T = 295 \text{ K}$  и поле смещения  $H = 57 \text{ Oe}$ , отвечающему максимуму пьезомагнитного коэффициента  $q_{11} = \partial\lambda_{11}/\partial H$  слоя Ni.



**Рис. 1.** Частотные зависимости амплитуды напряжения, генерируемого образцом PMN-PT/Ni: *a* — при постоянной температуре  $T = 295$  К; *b, c* — при различных температурах от 215 до 340 К. Цифры у кривых соответствуют значениям температуры. На вставке рис. 1, *a* схематически изображен композитный образец.



**Рис. 2.** Температурные зависимости: *a* — резонансных частот, *b* — амплитуд (точки)  $u_1$  и  $u_2$  и добротностей (кружки) резонансов  $Q_1$  и  $Q_2$  для композитного образца PMN-PT/Ni.

Резонансы с частотами  $f_1 = 24.4$  kHz,  $f_2 = 169.7$  kHz, добротностями  $Q_1 = 74$ ,  $Q_2 = 106$  и амплитудами  $u_1(f_1) = 0.46$  V,  $u_2(f_2) = 0.102$  V соответствуют возбуждению в образце низших мод изгибных и планарных акустических колебаний. Коэффициенты МЭ-взаимодействия для этих резонансов при комнатной температуре равны  $\alpha_{E1} = 8.7 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Oe}^{-1}$  и  $\alpha_{E2} = 6.2 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Oe}^{-1}$ . Увеличение температуры образца в интервале 220–360 K приводило, как демонстрирует рис. 1, *b* и *c*, к монотонному смещению обоих резонансов вниз по частоте с одновременным изменением их амплитуд.

На рис. 2 приведены температурные зависимости частот  $f_1$ ,  $f_2$ , амплитуд  $u_1$ ,  $u_2$  и добротностей  $Q_1$ ,  $Q_2$  для обоих резонансов. Обра-

щает на себя внимание значительное изменение частоты резонансов с температурой: для низкочастотного —  $\Delta f_1/f_1 \approx 10.6\%$ , для высокочастотного —  $\Delta f_2/f_2 \approx 6\%$ . Для низкочастотного резонанса амплитуда и добротность одновременно начинают снижаться вблизи температуры  $T_1 \approx 280$  К, а для высокочастотного — вблизи  $T_2 \approx 330$  К. Температурное изменение коэффициентов МЭ-взаимодействия на резонансных частотах пропорционально изменению напряжений  $u_1$  и  $u_2$  на рис. 2, *b*.

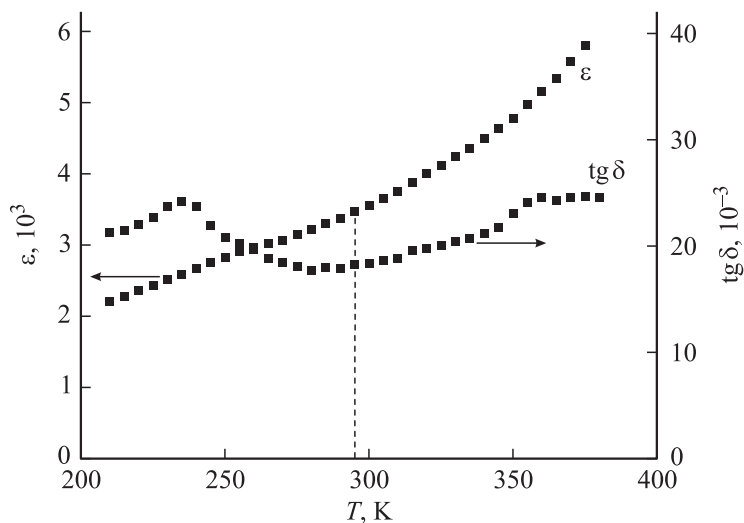
Частоты акустических резонансов структуры оценим по формулам для частот изгибных  $f_1$  и планарных  $f_2$  колебаний свободного стержня длиной  $L$  и толщиной  $b$  [4]:

$$f_1 = \frac{\beta_1}{2\pi} \frac{b}{L^2} \sqrt{\frac{Y}{12\rho(1-\gamma^2)}} \quad \text{и} \quad f_2 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{Y}{\rho(1-\gamma^2)}}, \quad (1)$$

где  $\beta_1 = 22.4$  — коэффициент для низшей моды изгибных колебаний,  $Y$  — модуль Юнга,  $\rho$  — плотность,  $\gamma$  — коэффициент Пуассона. Эффективные значения  $Y$  и  $\rho$  для двухслойной структуры находятся по формулам:  $Y = (Y_p b_p + Y_m b_m)/(b_p + b_m)$  и  $\rho = (\rho_p b_p + \rho_m b_m)/(b_p + b_m)$ , где  $Y_p$  и  $Y_m$ ,  $\rho_p$  и  $\rho_m$ ,  $b_p$  и  $b_m$  — модули Юнга, плотности и толщины ПЭ- и ФМ-слоев композита,  $b = b_p + b_m$ .

Подставляя в (1) параметры материалов (PMN-PT:  $Y_p = 4.35 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\rho_p = 7.9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; Ni:  $Y_m \approx 21.5 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\rho_m \approx 8.9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\gamma \approx 0.35$ ) и размеры образца, используемого в эксперименте, получаем  $f_1 \approx 25.74$  кГц,  $f_2 \approx 179$  кГц. Рассчитанные значения хорошо совпадают с измеренными, что подтверждает увеличение эффективности МЭ-взаимодействия при возбуждении именно изгибных и планарных колебаний структуры.

Температурные зависимости частот и эффективностей резонансного МЭ-взаимодействия обусловлены изменением параметров слоев композита. Из формул (1) следует, что сдвиг частот может быть вызван изменением либо размеров слоев ( $b_p$ ,  $b_m$ ,  $L$ ), либо модулей Юнга ( $Y_p$ ,  $Y_m$ ) материалов. Коэффициенты линейного теплового расширения для PMN-PT и Ni равны  $\tau_p \approx 7 \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup> и  $\tau_m \approx 13.3 \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup> соответственно, поэтому сдвиг частот за счет теплового расширения при  $\Delta T = 140$  К мал  $\Delta f/f \approx \Delta T(\tau_m - \tau_p) < 0.1\%$ . Проведенные измерения зависимостей частоты планарного резонанса  $f_2$  на отдельно взятых пластине PMN-PT и пластине Ni показали, что при увеличении температуры от 220 до 380 К модуль  $Y_p$  монотонно уменьшается на  $\sim 13\%$ , а  $Y_m$  —



**Рис. 3.** Температурные зависимости диэлектрической постоянной  $\varepsilon$  и параметра потерь  $\text{tg } \delta$  для слоя PMN-PT композитного образца. Вертикальная штриховая линия соответствует комнатной температуре.

на  $\sim 70\%$ . Таким образом, сдвиг частот резонансов МЭ-структуры обусловлен в основном изменением модулей Юнга материалов.

Амплитуда МЭ-сигнала на частоте резонанса связана с основными параметрами композита формулой [3]  $u \sim Qd_{31}q_{11}/(\varepsilon A - d_{31}^2)$ , где коэффициент  $A$  выражается через толщины и модули Юнга его слоев и слабо зависит от  $T$ . Отсюда следует, что изменение напряжения  $u$  определяется температурными зависимостями добротности образца  $Q$ , пьезомодуля  $d_{31}$  и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  PMN-PT и пьезомагнитного коэффициента  $q_{11}$  никеля. Как видно из рис. 2,  $b$ , амплитуды и добротности резонансов слабо меняются в области низких температур, а резкое уменьшение  $u_1$  и  $u_2$  происходит при тех же  $T_1$  и  $T_2$ , что и падение добротностей. На рис. 3 приведены измеренные температурные зависимости  $\varepsilon$  и параметра диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta \sim 1/Q$  слоя PMN-PT. С увеличением температуры  $\varepsilon$  возрастает от  $2.2 \cdot 10^3$  до  $5.8 \cdot 10^3$ , что вызывает уменьшение  $u$  с ростом  $T$ . Изменение потерь  $\text{tg } \delta$  ПЭ-слоя, как видно из рис. 3, слабо влияет на

температурную зависимость напряжения. К падению  $u$  с увеличением  $T$  приводит, по-видимому, также ослабление механической связи между слоями из-за размягчения клея при нагревании образца.

Таким образом, показано, что для композитных структур PMN-PT/Ni увеличение температуры в интервале 220–340 К вызывает уменьшение частоты и эффективности резонансного МЭ-взаимодействия. Понижение резонансной частоты объясняется температурной зависимостью модулей Юнга слоев композита, а падение эффективности обусловлено ростом диэлектрической проницаемости PMN-PT и уменьшением механической связи между слоями структуры. Более слабой зависимости характеристик МЭ-взаимодействия от температуры можно ожидать в монолитных образцах, изготовленных методами электролитического осаждения или напыления магнитных слоев [5] и содержащих более термостабильные пьезоэлектрические слои.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования науки РФ и Российского фонда фундаментальных исследований.

## Список литературы

- [1] Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. P. 131 101.
- [2] Srivasan G., Fetisov Y.K. // Ferroelectrics. 2006. V. 342. P. 65–71.
- [3] Bichurin M.I., Fillipov D.A., Petrov V.M. // Phys. Rev. 2003. V. B68. P. 132 408.
- [4] Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: КомКнига, 2007. 440 с. (Timoshenko S.P. Vibration Problems in Solids. D. Van Nostrand, Toronto. 1955. 439 p.)
- [5] Chashin D.V., Fetisov Y.K., Tafintseva E.V., Srinivasan G. // Solid State Com. 2008. V. 148. P. 55–58.