

05

## Магнитоэлектрический эффект в структуре никель–арсенид галлия–никель

© Д.А. Филиппов<sup>1</sup>, Т.О. Фирсова<sup>1</sup>, В.М. Лалетин<sup>2</sup>,  
Н.Н. Поддубная<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Новгородский государственный университет, Великий Новгород, Россия

<sup>2</sup> Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь

E-mail: dmitry.filipov@novsu.ru

Поступило в Редакцию 26 июня 2016 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований магнитоэлектрического эффекта в структурах, полученных электролитическим осаждением никеля на подложку из арсенида галлия. Показано, что использование подслоя золото–германий–никель, напыленного на подложку, значительно повышает адгезию между электролитически осажденным никелем и подложкой. В полученных структурах обнаружен как линейный, так и нелинейный по переменному магнитному полю магнитоэлектрический эффект. Оба эффекта имеют резонансный характер, причем резонансная частота нелинейного эффекта в два раза меньше резонансной частоты линейного эффекта.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.06.44406.16488

Слоистые магнитоэлектрические (МЭ) композиты представляют собой структуры, состоящие из чередующихся, механически взаимодействующих между собой, магнитострикционных и пьезоэлектрических пластин. Они имеют определенные преимущества перед объемными композитами: лучше поляризуются, в качестве магнитострикционной фазы можно использовать металлы, обладающие большим коэффициентом магнитострикции [1]. Однако большим недостатком слоистых структур является плохая механическая прочность, расслоение образцов по границам фаз. Большинство слоистых структур получают с использованием промежуточного полимерного слоя (клея), что ухудшает параметры, приводит к нежелательно высокой температурной зависимости, уменьшению добротности структуры. В работе [2] исследован МЭ-эффект в структуре никель–арсенид галлия, где магнитострик-

ционная фаза наносилась на пьезоэлектрическую подложку методом напыления. Это обеспечивает хороший механический контакт между фазами, но не позволяет получить большое значение эффекта. Как показано в работе [3], максимальное значение эффекта достигается при условии выполнения равенства

$$p_t \sqrt{pY} = m_t \sqrt{mY}, \quad (1)$$

где  $pY$ ,  $mY$  — модули Юнга пьезоэлектрика и магнетика,  $p_t$ ,  $m_t$  — соответственно их толщины. Модули Юнга пьезоэлектрика и магнетика, как правило, отличаются не более чем в два раза, поэтому максимальное значение эффекта получается при примерно одинаковых толщинах магнетика и пьезоэлектрика. Использование метода электролитического осаждения позволяет получить магнитострикционные слои, толщина которых хоть и меньше толщины подложки, но позволяет приблизиться к оптимальному соотношению, определяемому уравнением (1). Однако при больших толщинах магнитострикционного слоя возникает проблема с адгезией. Полученные ранее образцы с толщиной магнитострикционной фазы до  $100 \mu\text{m}$  показывали существенное снижение адгезионных свойств, вследствие чего величина эффекта в таких структурах значительно ниже, чем в клеевых структурах [4]. Задача данной работы заключалась в разработке технологии получения магнитострикционно-пьезоэлектрических структур, обладающих хорошей адгезией между слоями и имеющих соотношение между толщиной магнитострикционного и пьезоэлектрического слоев, близкое оптимальному. Такие структуры должны обладать хорошими механическими свойствами, иметь высокую добротность и большие значения величины магнитоэлектрического эффекта. В данной работе для улучшения адгезии между слоями использовались подслои, которые наносились на подложку методом электронно-лучевого напыления. Адгезия определялась методом царапания и методом наклейки на скотч. Как показали результаты многочисленных опытов, для подложки из GaAs наилучшие результаты достигаются при использовании подслоев состава Au–Ge–Ni. Толщина каждого подслоя составляла порядка  $0.15 \mu\text{m}$ .

При изготовлении слоистых структур, как правило, в качестве пьезоэлектрика выбирают материал с наибольшей величиной пьезомодуля, например, цирконат-титанат свинца (ЦТС). Однако, как показывают расчеты [3], величина МЭ-эффекта прямо пропорциональна пьезомодулю и

обратно пропорциональна диэлектрической проницаемости пьезоэлектрика. Хотя величина пьезомодуля у GaAs в 37 раз меньше, чем у ЦТС (GaAs  $d = -2.69$  pC/N, ЦТС  $d = 100$  pC/N), его диэлектрическая проницаемость в 135 раз меньше, чем у ЦТС (GaAs  $\epsilon = 12.9$ , ЦТС  $\epsilon = 1750$ ). Это приводит к тому, что при прочих равных условиях следует ожидать, что величина МЭ-эффекта в структурах на основе GaAs будет в 3.5 раза больше, чем в структурах на основе ЦТС.

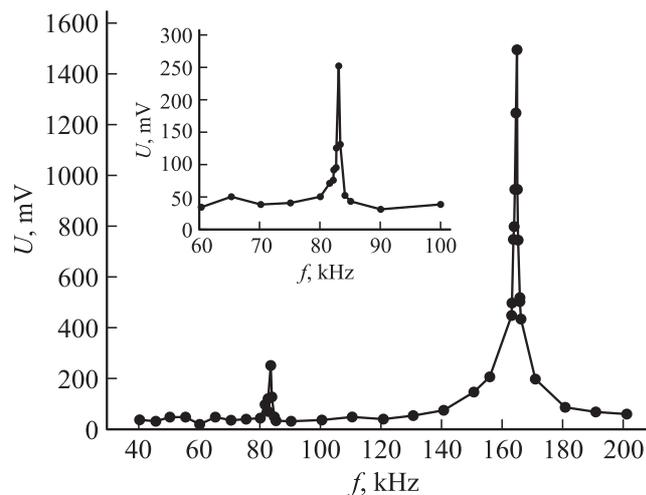
Еще одной проблемой при создании структур являются эффекты, возникающие на границе вследствие несоответствия фаз. Постоянная решетки GaAs равна 0.56533 nm, а у Ni она равна 0.3524 nm. Это приводит к тому, что при росте толстых слоев в структуре возникают большие механические напряжения. Если слой Ni осаждают с одной стороны подложки, то это приводит к короблению образца, в результате чего даже при небольших механических воздействиях структура разрушается. Поэтому при изготовлении структур использовалась трехслойная система Ni–GaAs–Ni. Это, с одной стороны, повышало прочность структуры и, с другой стороны, не позволяло образцам изменять свою первоначальную форму.

Арсенид галлия относится к гексатетраэдрическому классу (международный символ  $\bar{4}3m$ ), и отличными от нуля компонентами пьезомодуля будут  $d_{14} = d_{25} = d_{36}$ . Поэтому МЭ-эффект в GaAs возникает в результате распространения в структуре, в отличие от ЦТС, не продольных, а поперечных колебаний.

При помещении образца в переменное магнитное поле, имеющее  $Y$ -проекцию, в магнитострикционной компоненте возникают деформации сдвига в плоскости  $XU$ , которые посредством напряжений  $T_{yz}$  передаются в пьезоэлектрическую фазу, что приводит к изменению поляризации и возникновению напряжения между обкладками.

Магнитострикция в общем случае является нелинейным по намагниченности эффектом, причем ее величина для пленок зависит как от размера образца, так и от толщины пленки. Для образцов длиной порядка 14 mm с нанесенными пленками Ni зависимость магнитострикции от магнитного поля приведена в работе [5]. Как следует из графика, приведенного в этой работе, в области слабых полей (до 50 Oe) зависимость магнитострикции  $\lambda(H)$  можно представить в виде

$$\lambda(H) = qH + gH^2. \quad (2)$$



Частотная зависимость МЭ-эффекта для структуры Ni–GaAs–Ni. Переменное магнитное поле  $H = 0.1$  Ое, поле подмагничивания  $H_{bias} = 10$  Ое.

Здесь введены обозначения  $q = \frac{\partial \lambda}{\partial H} \Big|_{H=H_{bias}}$  — пьезомагнитный коэффициент,  $g = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial H^2} \Big|_{H=H_{bias}}$  — магнитострикционный коэффициент,  $H_{bias}$  — поле подмагничивания. Как следует из зависимости магнитострикции от магнитного поля, при нулевом поле подмагничивания она имеет экстремум, следовательно, при  $H_{bias} = 0$  пьезомагнитный коэффициент  $Q = 0$ , в то время как магнитострикционный коэффициент  $g \neq 0$ . Это приводит к тому, что линейный по переменному магнитному полю МЭ-эффект наблюдается только при наличии поля подмагничивания, за исключением случаев на образцах с гистерезисом [6]. Нелинейный МЭ-эффект наблюдается как при отсутствии, так и при наличии поля подмагничивания. Поскольку при нелинейном эффекте частота колебаний пропорциональна квадрату гармонического сигнала, то колебания среды возбуждаются с частотой в два раза большей частоты переменного магнитного поля. Вследствие этого резонансное возбуждение происходит на частоте магнитного поля, вдвое меньшей частоты основного резонанса.

На рисунке представлена экспериментально полученная частотная зависимость МЭ-эффекта в структуре Ni–GaAs–Ni. Структуры были изготовлены методом электролитического осаждения никеля на подложку из арсенида галлия с использованием подслоев Au–Ge–Ni. Образцы вырезались из пластин с ориентацией поверхности (100) толщиной  $t_p = 0.4$  mm в форме параллелепипеда длиной  $L = 15$  mm и шириной  $W = 5$  mm. Толщина каждого слоя никеля  $t_m = 20$   $\mu$ m. Длинная сторона образца имела направление  $\langle 110 \rangle$ . Образцы помещались в соленоид так, чтобы длинная грань образца составляла с осью соленоида угол  $45^\circ$ . Величина переменного магнитного поля была равна  $H = 0.1$  Oe.

Как видно из рисунка, наряду с основным резонансом на частоте  $f_1 = 165$  kHz, наблюдается дополнительный резонанс на частоте  $f_2 = 82.5$  kHz, вдвое меньшей частоты основного резонанса. Частотная зависимость МЭ-эффекта в области второго резонанса дополнительно показана на вставке. Величина этого резонанса не изменялась при изменении поля подмагничивания. Пиковое значение напряжения линейного МЭ-эффекта составляет  $U_{res} = 1.5$  V, что дает при толщине пьезоэлектрика  $t_p = 0.4$  mm и величине магнитного поля  $H = 0.1$  Oe значение МЭ-коэффициента  $\alpha_E = U/(t_p H) = 375$  V/(cm · Oe) или  $\alpha_E = 470$  V/A, что в пять раз превышает значение МЭ-коэффициента по напряжению для структур, полученных напылением Ni на подложку из GaAs ( $\alpha_E = 85$  V/A), и превышает также значение МЭ-коэффициента для клеевых структур Ni–ЦТС–Ni ( $\alpha_E = 113$  V/A).

Таким образом, использование подслоев Au–Ge–Ni, нанесенных на подложку из GaAs с последующим электролитическим осаждением Ni, позволяет получить структуры с толщиной магнитострикционного слоя 20–30  $\mu$ m, имеющей хорошую адгезию между слоями. В структуре наблюдается как линейный по переменному магнитному полю МЭ-эффект, так и нелинейный. Резонансное значение МЭ-коэффициента у полученных структур почти в пять раз превышает значение для структур, полученных напылением Ni на подложку из GaAs и клеевых структур Ni–ЦТС–Ni.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект № 11.177.2014/К) и грантов совместного конкурса РФФИ–БРФФИ: Российский грант № 16-52-00184 Бел\_а, Белорусский грант № Ф16Р-130.

**Список литературы**

- [1] Филиппов Д.А., Лалетин В.М., Srinivasan G. // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 1. С. 47–51.
- [2] Лалетин В.М., Стогний А.И., Новицкий Н.Н., Поддубная Н.Н. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 21. С. 71–77.
- [3] Филиппов Д.А., Лалетин В.М., Galichyan T.A. // ФТТ. 2013. Т. 55. В. 9. С. 1728–1733.
- [4] Paddubnaya N.N., Laletsin V.M., Stognij A.I., Novitskii N.N. // Funct. Mater. 2010. V. 17. N 3. P. 329–333.
- [5] Burdin D.A., Chashin D.V., Ekonomov N.A. et al. // JMMM. 2014. V. 358–359. P. 98–104.
- [6] Бурдин Д.А., Фетисов Л.Ю., Фетисов Ю.К. и др. // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 9. С. 90–95.