

УДК 537.9

А.О. Хребтов, Н.М. Лавриненко, А.Н. Пересадченко,

В.П. Комаров, Ю.А. Алехов

НТЦ «Реактивэлектрон» НАН України

ул. Бакинских комиссаров, 17а, г. Донецк, 83049, Украина

e-mail: mezozavr@ukr.net, n.m.lavr@mail.ru

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ФЕРРИТ-ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ИХ СОСТАВА

Проведено экспериментальное исследование и сравнительный анализ величины магнитоэлектрического эффекта в композиционных двухслойных дисковых структурах, состоящих из попарных слоев магнитострикционного магнетомягкого никель-цинкового феррита и сегнетомягкой (ЦТССт-2), сегнетожесткой (ЦТССт-3) пьезокерамики. Показано, что на частоте электромеханического резонанса в образце, состоящем из магнетомягкого никель-цинкового феррита и сегнетомягкой пьезокерамики магнитоэлектрический отклик увеличивается в 150 раз.

**Ключевые слова:** слоистые магнитоэлектрические композиты, магнитоэлектрический отклик.

### Введение

Диэлектрические, полупроводниковые и магнитные материалы играют все более важную роль в современной технике, включая такие передовые ее направления как электроника, радиотехника, автоматика и приборостроение. Все возрастающая тенденция в электронике к использованию монолитных твердотельных элементов, их миниатюризации требует поиска новых способов преобразования переменных электрических и магнитных полей. Для этой цели перспективным направлением является использование магнитоэлектрического (МЭ) эффекта в феррит-пьезоэлектрических композитах.

Магнитоэлектрический эффект относится к перекрестным эффектам и заключается в возникновении поляризации под действием магнитного поля и, наоборот, в возникновении намагниченности под действием электрического поля. В феррит-пьезоэлектрических композитах МЭ эффект отсутствует по отдельности и в ферритовой, и в пьезоэлектрической фазах. Его возникновение обусловлено меха-

ническим взаимодействием магнито-стрикционной и пьезоэлектрической подсистем.

Многослойные композиционные структуры представляют широкие возможности для формирования характеристик МЭ взаимодействия. Величиной эффекта можно управлять за счет выбора материала слоев и геометрических параметров структуры, с помощью внешних электрических и магнитных полей.

Проведенные ранее исследования показывают [1-4], что МЭ эффект в таких композиционных структурах имеет огромную величину и на несколько порядков выше эффекта наблюдаемого в природных кристаллах, что позволяет реально использовать МЭ эффект в электронной технике.

В данной работе проведено экспериментальное исследование и выполнен сравнительный анализ величины МЭ эффекта в двухслойных МЭ структурах, состоящих из попарных слоев сегнетомягкой (ЦТССт-2), сегнетожесткой (ЦТССт-3) пьезокерамики и магнетомягкого никель-цинкового феррита.

## Электrofизические параметры материалов

Материал	Состав материала	Коэффициент магнитострикции, $\lambda_s, \cdot 10^{-6}$	Пьезомодуль, $d_{33}, \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н}$	$\epsilon$	$\mu_{нач}$	$\rho, \text{ Ом} \cdot \text{м}$
NiZn-феррит	NiO-11.0 ZnO-22.5 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -66.5	25	-	100	600	10 <sup>2</sup>
Пьезокерамика ЦТССТ-2		-	1200	3000	-	10 <sup>11</sup>
Пьезокерамика ЦТССТ-3		-	450	1400	-	10 <sup>11</sup>

В таблице 1 показаны электрофизические параметры, используемых в работе материалов.

Ферритовый материал (никельцинковый феррит) получали по керамической технологии (смешение исходных сырьевых компонентов в виде оксидов, синтез материала при температуре 800°С×2ч., подготовка заготовок для спекания, проведение термообработки (температура спекания 1250°С×4ч., охлаждение – воздух)). Для исследования МЭ эффекта из спеченных заготовок феррита вырезались образцы в форме диска диаметром 5 мм и высотой 5 мм.

Пьезокерамические материалы (ЦТССТ-2, ЦТССТ-3) получали по традиционной керамической технологии, включающей ряд технологических операций (смешение исходных сырьевых компонентов – помол; синтез полученных смесей при температуре 800–900°С; прессовка заготовок в виде дисков диаметром 5.5 мм и высотой 5.5 мм; спекание керамики на воздухе под слоем засыпки на основе оксида свинца при температуре 1200–1300°С). Спеченные образцы шлифовали до необходимых размеров, отжигали при температуре 1000°С×1ч. для снятия механических напряжений, металлизировали путем вжигания серебряной пасты при температуре 800°С. Металлизированные образцы

сегнетомягкой керамики поляризовали на воздухе при температуре Кюри (190°С) в электрическом поле напряженностью 600 В/мм; образцы сегнетожесткой керамики поляризовали температуре 290°С в электрическом поле напряженностью 800 В/мм. Пьезоэлектрические свойства керамики (см. табл. 1) измеряли методом резонанса-антирезонанса [5]. Генерируемый структурой сигнал снимали с электродов пьезокерамических дисков.

По терминологии, используемые сегнетомягкую (ЦТССТ-2) и сегнетожесткую (ЦТССТ-3) керамики можно связать с облегченностью или затруднительностью (мягкостью или жесткостью) по отношению к деполяризации, т.е. к переориентации сегнетоэлектрических доменов. Сегнетомягкая керамика обладает пониженным коэрцитивным полем, сегнетожесткая – наоборот, в первой – подвижность доменных границ облегчена, во второй – затруднена. Для сегнетомягкой керамики характерны повышенная диэлектрическая проницаемость, низкое коэрцитивное поле, относительно прямоугольные петли гистерезиса, повышенные пьезосвойства.

В сегнетожесткой сегнетокерамике вышеперечисленные параметры изменяются в противоположном направлении [6].

Блок-схема установки для исследования характеристик МЭ взаимодействия в

многослойных структурах в области низких частот модуляция магнитного поля приведена на рисунке 1.

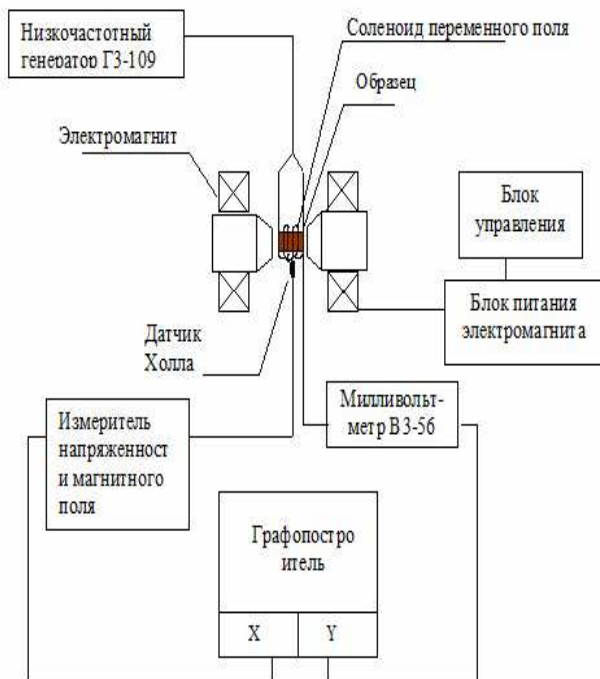


Рис. 1. Блок-схема установки.

Схема нашей установки представлена на рис.1. Она состоит из электромагнита с источником питания, электромагнитных катушек, подключенных к генератору, системы регистрации и записи выходного магнитоэлектрического сигнала. Соленоид подключен к низкочастотному генератору, который генерирует гармоническое магнитное поле с амплитудой до 15 Э и частотой в диапазоне 10 Гц - 400кГц.

Экспериментальные исследования проводились для образцов объемного композиционного материала, образцы имели форму дисков диаметром  $D = 5.0 \pm 0.1$  мм и высотой  $h = 5.0 \pm 0.1$  мм. Для исследования МЭ эффекта использовался метод, основанный на измерении переменного напряжения, возникающего на образце при приложении на него переменного и медленно меняющегося магнитного поля. Направление электрической поляризации пьезокерамики и приложенного магнитного поля направлены перпендикулярно плоскости образцов.

Поскольку в МЭ композитах возникновение электрической поляризации в магнитном поле происходит благодаря механическим деформациям, то вблизи частот электромеханического резонанса образца величина магнитоэлектрического отклика должна существенно возрасти. Результаты исследований МЭ эффекта в двухслойных феррит-пьезоэлектрических композитах показывают (рисунок 2), что величина напряженности электрического поля, возникающего на обкладках пьезоэлектрического слоя, возбуждаемого магнитным полем  $h_f = h_0 \cos(2\pi ft)$  (где амплитуда поля  $h_0 = 0,05$  Э, частота  $f$  изменяется в диапазоне 0 кГц – 400 кГц; магнитное поле направлено перпендикулярно к плоскости структуры, т.е. рассматривается мода  $T-T$ ) достигает максимальных значений в МЭ структурах, состоящих из сегнетомягкой пьезокерамики (ЦТССт-2) и магнитомягкого никель-цинкового феррита (на рисунке кривая – 1). На частоте электромеханического резонанса магнитоэлектрический отклик  $\alpha_{E,33}$  имеет значение в 150 раз превышающее  $\alpha_{E,33}$  вдали от резонанса.

В двухслойных МЭ структурах, состоящих из сегнетожесткой пьезокерамики (ЦТССт-3) и магнитомягкого никель-цинкового феррита, увеличение напряженности электрического поля на обкладках пьезоэлектрического слоя, возбуждаемого магнитным полем  $h_f$  на частоте электромеханического резонанса, не превосходит 15 раз (рис. 2, кривая 2).

Разницу в величине генерируемого электрического поля в композитах 1 и 2 (см. рис. 2) можно связать с пониженным коэрцитивным полем в сегнетомягкой керамике ЦТССт-2, благодаря чему облегчена переориентация сегнетоэлектрических доменов при поляризации.

Величина генерируемого напряжения  $U$  пропорциональна следующему произведению:

$$U \sim (\partial \lambda / \partial H) \cdot d / \varepsilon,$$

где  $\lambda$  – коэффициент магнитострикции никель-цинкового феррита;  $d$  – пьезомодуль пьезокерамики;  $\varepsilon$  – эффективная

диэлектрическая проницаемость двухслойной структуры.

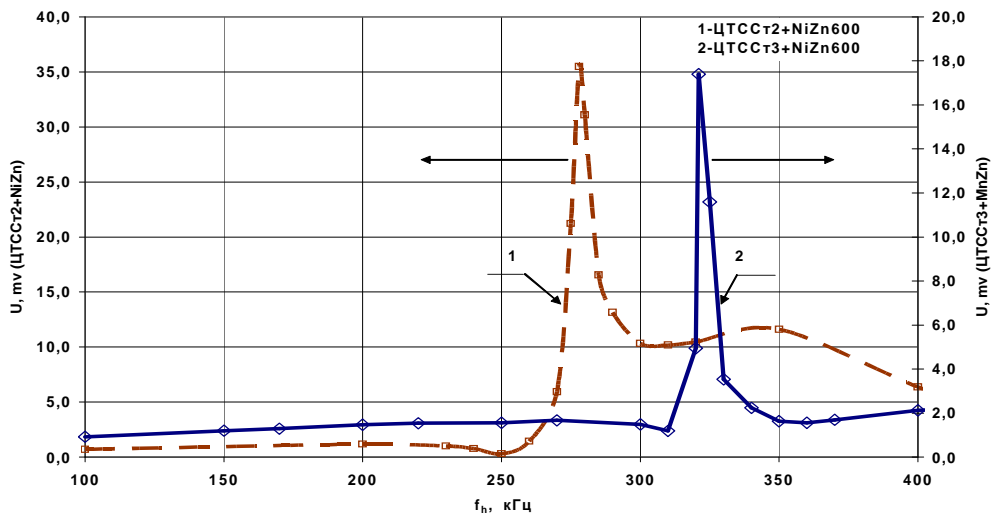


Рис. 2. Зависимость магнитоэлектрического напряжения от частоты.

Значение пьезоэлектрического коэффициента сегнетомягкой керамики ( $d/\varepsilon$ ) значительно больше, чем сегнетожесткой (см. табл. 1), что также объясняет значение повышенного генерируемого электрического напряжения.

### Выводы

Показано, что в двухслойных феррит-пьезоэлектрических композитах, состоящих из сегнетомягкой пьезокерамики (ЦТССт-2) и магнитомягкого никель-цинкового феррита, величина напряженности электрического поля, возникающего на обкладках пьезоэлектрического слоя,

возбуждаемого магнитным полем, достигает максимальных значений (увеличение в 150 раз).

В двухслойных МС структурах, состоящих из сегнетожесткой пьезокерамики (ЦТССт-3) и магнитомягкого NiZn – ферритового материала увеличение напряженности электрического поля на обкладках пьезоэлектрического слоя, возбуждаемого магнитным полем не превосходит 15 раз.

Рассмотренные композиционные магнитоэлектрические структуры перспективны для создания датчиков магнитных полей, преобразователей электрической энергии.

### СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nan C.W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status and future directions // J. Appl. Phys.-2008. – v.103. – 031101:1-031101:35.
2. Ryu J., Carazo A.V., Uchino K., Kim H.-E. Magnetoelectric properties in piezoelectric and magnetostrictive laminate composites // Japanese Journal of Applied Physics. – 2001. – vol.40, no.8. – P. 4848-4951.
3. Ekrem N.B., Olabi A.G., Prescott T., Rafferty A., Hashmi M.S.J. An Overview of Magnetostriction, its Use and Methods to Measure These Properties // J. of Materials Processing Technology. – 2007. – v. 191. – P. 96-101.
4. Zhai J.Y., Cai N., Shi Z., Lin Y.H., Nan C.W. Dielectric, ferroelectric, magnetic and magnetoelectric properties of multiferroic composites // J. Phys. D. – 2004. – v. 37. – P. 823-826.

5. ОСТ 1104444-87. Отраслевой стандарт. Материалы пьезокерамические. Технические условия. Введено 01.01.88. – 140 с.

6. Яффе В., Кук У., Яффе Г. Пьезо-электрическая керамика – М.: Мир, 1974. – 288 с.

Стаття надійшла до редакції 20.07.2012

A.O. Khrebtov, N.M. Lavrinenko, O.M. Peresadchenko,  
V.P. Komarov, U.O. Alehov

STC "Reactivelectron" NASc Ukraine, Str. Baku commissars, 17a Donetsk, 83049, Ukraine  
e-mail: *mezozavr@ukr.net, n.m.lavr@mail.ru*

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE MAGNETOELECTRIC EFFECT IN MAGNETOSTRICTIVE AND PIEZOELECTRIC MATERIALS WITH THE AIM TO OPTIMIZE THEIR COMPOSITION

Experimental investigation of the magnetoelectric effect in two-layered laminate composites has been conducted. To optimize the magnetoelectric laminate the magnetoelectric interaction in ЦТССт-2/Ni-Zn ferrit increases 150x on the piezomagnetic properties of individual disk layers. It is shown that a magnitude of electromechanical resonance frequency that is higher as compared to other compositions.

**Key words:** magnetoelectric laminate composites, magnetoelectric, piezoelectric, magnetostrictive.

A.O. Хребтов, Н.М. Лавріненко, О.М. Пересадченко,  
В.П. Комаров, Ю.О. Альохов

НТЦ «Реактивелектрон» НАН України, Донецьк, 83049, Україна  
e-mail: *mezozavr@ukr.net, n.m.lavr@mail.ru*

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ФЕРРИТ-ПЬЕЗОЕЛЕКТРИЧНИХ СТРУКТУР З МЕТОЮ ОПТИМІЗАЦІЇ ЇХ СКЛАДУ

Проведено експериментальне дослідження та виконано порівняльний аналіз величини магнітоелектричного ефекту в композиційних двошарових дискових структурах, які складаються з попарних шарів магнітострикційного магнітом'якого нікель-цинкового фериту та сегнетом'якої (ЦТССт-2), сегнетотвердої (ЦТССт-3) пьезокераміки. Показано, що на частоті електромеханічного резонансу у зразку, що складається з магнітом'якого нікель-цинкового фериту і сегнетом'якої пьезо-кераміки, магнітоелектричний відгук збільшується у 150 разів.

**Ключові слова:** шаруваті магнітоелектричні композити, магнітоелектричний відгук.