

УДК 535.42

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МАГНИТОУПРУГОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ПОРИСТЫХ И КОМПОЗИТНЫХ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Руденко В. В.^{1,2}, Бержанский В. Н.¹, Полулях С. Н.¹,

Pernod P.², Преображенский В. Л.²

¹*Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского, Симферополь, Украина
E-mail: roton@crimea.edu*

²*Joint European Laboratory LEMAC:*

*- Institut d'Electronique, de Micro-électronique et de Nanotechnologie (IEMN-DOAE-UMR CNRS
8520), Ecole Centrale de Lille, Villeneuve d'Ascq, France*

E-mail: vladimir.preobrajenski@iemn.univ-lille1.fr, philippe.pernod@wanadoo.fr

*- Научный центр волновых исследований Института общей физики им. А. М. Прохорова
РАН*

Оригинальным импульсным методом исследовано параметрическое взаимодействие магнитоупругих колебаний с полем магнитной накачки в пористом феррите состава $Fe_{1.943}Ni_{0.945}Co_{0.026}Sm_{0.059}O_4$ и композитном материале на основе $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$. Приведены данные измерений магнитоакустических параметров, в т.ч. чувствительности скорости звука к переменному магнитному полю. Обсуждаются возможность применения таких структур в гидроакустических системах обращения волнового фронта.

Ключевые слова: феррит, композит, Терфенол-D, параметрическое взаимодействие, магнитоупругая связь.

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря широкому спектру свойств пористые и композитные пьезоэлектрические и магнестрикционные материалы находят широкое применение в современных ультразвуковых приложениях [1-6]. Изучение таких материалов как активных сред с контролируемым электромагнитным полем параметрами представляет большой интерес для систем обращения волнового фронта (ОВФ) ультразвука [7]. В настоящее время такой средой являются поликристаллические магнестрикционные диэлектрики на основе никелевых ферритов [7]. Достаточно высокая магнитоупругая связь в таких материалах обеспечивает эффективную модуляцию скорости звука переменным магнитным полем, что позволяет работать в запороговом режиме обращения с гигантским параметрическим усилением обращенной волны. Керамическая технология позволяет изготавливать образцы с широкой апертурой, что необходимо для точного воспроизведения акустического поля первичной волны. Механизм и особенности процессов обращения волнового фронта изучены теоретически и экспериментально в работах [7-10]. Предложен и реализован ряд ОФВ устройств, в частности, акустический микроскоп [11] и система нелинейной визуализации ультразвуковых изображений [12, 13]. С другой стороны, биомедицинские и

гидроакустические приложения требуют специфических условий акустического согласования активной среды с исследуемой жидкостью (как правило, водой). Эти требования стимулируют поиск новых магнитоакустических материалов. Применение пористых структур как одно из решений проблемы сопряжения пьезоэлектрических преобразователей с жидкостями предложено в работе [5]. Альтернативным решением является использование композитных материалов, содержащих активное вещество в виде порошка, равномерно распределённого в матрице, акустические параметры которой близки к воде [4, 6].

В настоящей работе экспериментально исследовано параметрическое взаимодействие магнитоупругих колебаний с полем электромагнитной накачки в пористом никелевом феррите состава $\text{Fe}_{1.943}\text{Ni}_{0.945}\text{Co}_{0.026}\text{Sm}_{0.059}\text{O}_4$ и композитном материале на основе $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2$ (Терфенол-D). Приведены данные измерений магнитоакустических параметров, определена чувствительность скорости звука к переменному магнитному полю параметрической накачки. Обсуждаются возможность использования исследуемых материалов в гидроакустических системах, использующих принцип обращения волнового фронта.

1. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования выполнены на образце пористого феррита состава $\text{Fe}_{1.943}\text{Ni}_{0.945}\text{Co}_{0.026}\text{Sm}_{0.059}\text{O}_4$, с объемом пор, составляющим 43% от общего объема образца. Образец имел форму цилиндра диаметром 13.9 мм и высотой – 34.7 мм. Образец композита содержал магнитоакустически активное вещество в виде порошка Терфенола-D с размером частиц 60–90 мкм, равномерно внедренного в матрицу отвержденной эпоксидной смолы. Концентрация активного вещества составляла ~ 55 % объема. Образец имел форму параллелепипеда с размерами 50.2x10x5.6 мм. Магнитоупругие колебания возбуждались и регистрировались с помощью катушки индуктивности, намотанной вдоль длинной стороны образца и содержащей 120 и 200 витков для феррита и композита соответственно. Возбуждение осуществлялось на частоте фундаментальной моды продольных колебаний вдоль длинной стороны образца. Предварительные измерения магнитоакустических характеристик образцов включали измерения зависимости резонансной частоты и добротности моды от напряженности постоянного магнитного поля. Резонансная линия наблюдалась и анализировалась с помощью панорамного характериографа НР4195А. Результаты измерений петель гистерезиса резонансной частоты и добротности для пористого феррита и композита приведены на рис. 1а и 1б соответственно.

Максимальная скорость продольного звука, соответствующая частоте резонансной моды, экспериментально измеренная плотность, вычисленные акустический импеданс и коэффициент прохождения T для исследуемых материалов, а так же для феррита и воды представлены в таблице 1. Акустический импеданс вычисляется как $Z = \rho \cdot V_{max}$, где ρ – плотность, V_{max} – максимальная скорость звука в зависимости от магнитного поля.

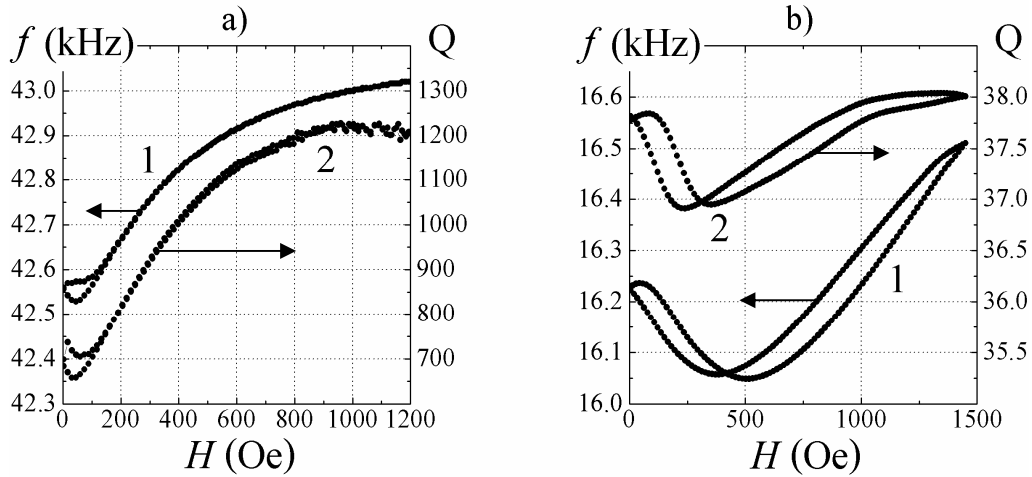


Рис. 1. Зависимость резонансной частоты фундаментальной моды (1) и добротности (2) образца феррита (а) и образца композита (б) от напряженности магнитного поля.

Таблица 1

Акустические параметры образцов активных сред и воды

Материал	V_{max} м/с	ρ кг/м ³	Z н·с/м ³ ·10 ³	T
Композит	1659	5336	8,9	0.50
Пористый феррит	2986	3017	9,0	0.49
Поликристаллический феррит	~6000	~5600	33	0.16
Water	1500	1000	1.5	1

Схема и методика эксперимента по исследованию параметрического взаимодействия магнитоупругих колебаний с переменным полем продольной электромагнитной накачки представлена на рис. 2 и 3 соответственно.

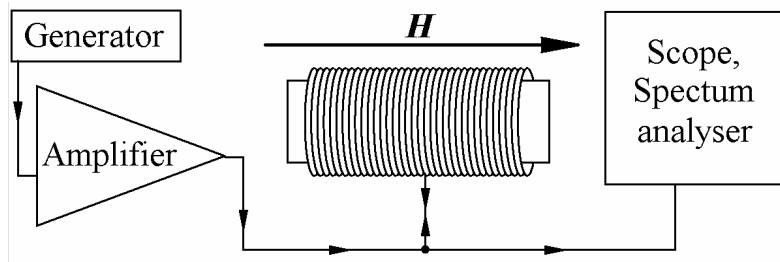


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

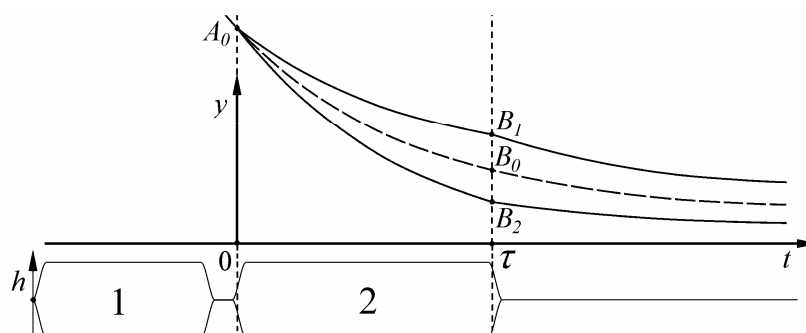


Рис. 3. Временная диаграмма, иллюстрирующая методику измерений. Обозначения: 1 – первый импульс, возбуждающий резонансные колебания; 2 – импульс параметрической накачки с удвоенной частотой заполнения, h – ось амплитуд импульсов, y – ось амплитуды резонансных колебаний, A_0 – амплитуда колебаний в момент начала действия второго импульса, B_0 – амплитуда свободно затухающих колебаний, $B_{1,2}$ – амплитуда колебаний после параметрического взаимодействия, τ – момент окончания действия накачки.

К катушке индуктивности последовательно прикладывались два радиоимпульса. Первый импульс с частотой заполнения, соответствовавшей частоте исследуемой моды, возбуждал резонансные колебания образца. По окончании первого импульса прикладывался импульс параметрической накачки с удвоенной частотой и варьируемой фазой. В отсутствие импульса накачки колебания свободно затухали (рис. 3, кривая A_0B_0). В зависимости от разности фаз первого и второго импульса, последний мог либо параметрически усилить, либо подавить затухающие колебания (рис. 3, кривые $A_0B_{1,2}$). Измерение амплитуды колебаний по окончании действия второго импульса позволяло определить инкремент параметрической неустойчивости и рассчитать глубину модуляции скорости продольного звука переменным магнитным полем.

Параметр материалов, предположительно используемых в системах ОФВ, анализируемый в первую очередь – чувствительность скорости звука к квазистатическому магнитному полю, представляемый как $k_{DC} = \omega^{-1} \partial\omega/\partial H$, где ω – резонансная частота, H – магнитное поле. Выбираемая далее рабочая точка H_m соответствует компромиссу между высокой добротностью Q и высокой чувствительностью k_{DC} (см. рис. 1).

На рис. 4а, б представлены зависимости относительного изменения амплитуды магнитоупругих колебаний от фазы импульса накачки для исследуемых образцов пористого феррита в поле намагничивания $H = 210$ Э и композита в поле $H = 1$ кЭ. Длительность импульса накачки τ составляла 5.5 и 0.6 мс для феррита и композита соответственно. Амплитуда переменного поля накачки составляла 34.8 Э для феррита и 97 Э для композита. Указанные параметры позволяли надежно регистрировать изменения декремента затухания в допороговом режиме накачки.

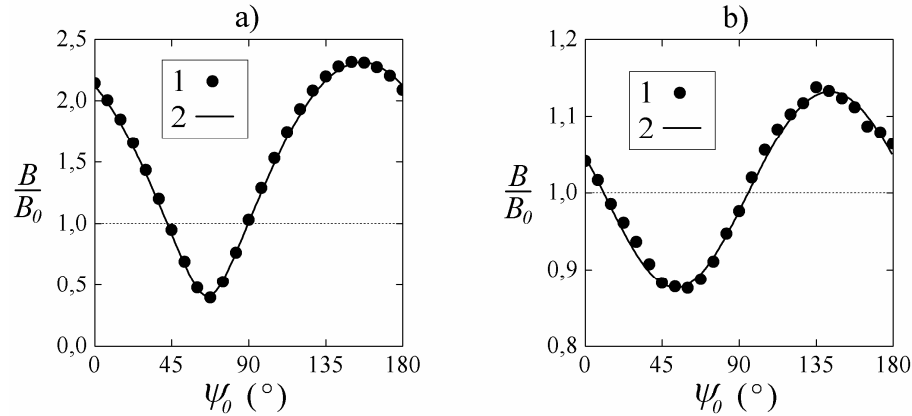


Рис. 4. Экспериментальные данные (1) и расчетные зависимости (2) относительной амплитуды колебаний в пористом феррите (а) и магнестрикционном композите (б).

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Параметрическое взаимодействие в акустическом резонаторе в квазилинейном приближении описывается системой уравнений для амплитуды и фазы упругого смещения вида:

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial t} + \left(\delta - \frac{1}{2} m \omega \sin(2\varphi) \right) B &= 0 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \frac{1}{2} m \omega \cos(2\varphi) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где ω и δ – частота и коэффициент затухания магнитоупругой моды, B – амплитуда упругого смещения, φ – сдвиг фазы смещения относительно фазы накачки на частоте 2ω , m – глубина модуляции резонансной частоты.

Решение системы уравнений (1), соответствующее моменту окончания импульса накачки длительности τ , может быть представлено в виде:

$$B = B_0 \exp \left\{ -\delta \tau + \Gamma \int_0^{\tau} \cos \left[2 \arctg \left(\operatorname{tg} \Psi_0 e^{-2\Gamma t} \right) \right] dt \right\}, \quad (2)$$

где $\Psi_0 = \varphi_0 - \pi/4$, B_0 и φ_0 – начальные амплитуда и фаза упругого смещения, $\Gamma = m\omega/2$ – инкремент параметрического усиления.

Величина Γ определялась с помощью аппроксимации данных измерений, представленных на рис. 4а, б формулой (2). Линии на рис. 4а, б представляют результаты вычислений для $\Gamma = 0.154 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ and $\Gamma = 0.16 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для пористого феррита и композита. Соответствующие значения глубины модуляции,

чувствительности скорости звука к постоянному полю k_{DC} и переменному полю $k_{AC} = \omega^{-1} \partial\omega/\partial h$ сведены в таблице 2. Методика и полученные с её помощью данные позволяют также вычислить пороговые ($\Gamma_C = \delta$) значения поля накачки h_C , пороговой глубины модуляции m_C и инкремента параметрической неустойчивости Γ_C , эти значения также представлены в таблице 2. Разница в k_{AC} и k_{DC} , обнаруженная экспериментально, может быть объяснена различием динамической и статической восприимчивости исследованных образцов.

Таблица 2

Параметры пористого феррита состава $Fe_{1.943}Ni_{0.945}Co_{0.026}Sm_{0.059}O_4$ и композита на основе Терфенола-D, полученные импульсным и непрерывным методами.

Материал	H_m кЭ	k_{DC} %/кЭ	Q	h Э	τ мс	Γ 10^3 с^{-1}	m 10^{-3}	k_{AC} %/кЭ	Γ_C 10^3 с^{-1}	m_C 10^{-3}	h_C Э
Композит	1.00	3.6	37	97.0	0.6	0.160	4.26	4.39	1.38	27	615
Пористый феррит	0.21	2.3	830	34.8	5.5	0.154	1,15	3.39	0.16	1.2	35.5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые исследовано магнитоупругое параметрическое взаимодействие в перспективных для систем обращения волнового фронта материалах – в композитном магнитострикционном материале на основе Терфенола-D и в пористом феррите структуры $Fe_{1.943}Ni_{0.945}Co_{0.026}Sm_{0.059}O_4$. Последний, обладая пористостью 43%, показал в 3,7 раза меньший акустический импеданс по сравнению с аналогичным ферритом с незначительным содержанием пор. Импеданс композита близок к импедансу пористого феррита, однако скорость звука в композите заметно ниже и близка к скорости звука в воде. Представленные экспериментальные результаты демонстрируют наличие в композите на основе Терфенола-D чувствительности скорости звука к переменному магнитному полю на уровне 4.39%/кЭ, в пористом феррите – 3.39%/кЭ. Из данных измерений инкремента усиления следует, что для достижения порога параметрической неустойчивости в реальных экспериментальных условиях достаточно повысить акустическую добротность композита до уровня $Q \sim 100$, что представляется технологически доступным. В случае пористого феррита представляется интересным синтез новых образцов со сниженным процентным содержанием пор, что позволит заметно повысить магнитоупругую связь, незначительно ухудшив акустическое согласование с водой.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках международного проекта ECO NET 2006-2007 и проекта INTERREG IIIa- 198 при поддержке Ecole Centrale de Lille (Франция).

Авторы благодарят доктора S. C. Busbridge за предоставленный образец композита.

Список литературы

1. L. Sandlund et. al. Magnetostriction, elastic moduli, and coupling factors of composite Terfenol-D. Journ. of Applied Physics, 1994, 75, 5656.
2. J. Hudson, S. C. Busbridge, A. R. Piercy. Magnetomechanical properties of epoxy-bounded Terfenol-D composites. Ferroelectrics, 1999, 228, 283.
3. J. H. Page, W. K. Hildebrand, J. Beck, R. Holmes, J. Bobowski. Phonons in porous media at intermediate frequencies. Phys. Stat. Sol.(c), 2004, 1, 2925 .
4. L. Krutyansky et. al. Ultrasonic properties of magnetoelastic composite material based on Terfenol-D. Abstr. of Int. Conf. "ICFM", Partenit, 2005, 195 .
5. M. Lethiecq, F. Levassort, Tran-Huu-Hue. New low acoustic impedance piezoelectric material for broadband transducer applications. Ultrasonics Symposium, 2004 IEEE 23-27, 2004, Aug. 2, 1153.
6. T. E. Gomez, Montero de Espinosa, F. Levassort, M. Lethiecq, A. James, E. Ringgard, C. E. Millar and P. Hawkins. Ceramic powder-polymer piezocomposites for electroacoustic transduction: modeling and design. Ultrasonics, 1998, 36 (9), 907.
7. А. Брысев и др. Обращение волнового фронта ультразвуковых пучков. Успехи физ. наук, 1998, 168 (8), 877.
8. P. Pernod, V. Preobrazhensky. Parametric phase conjugation of a wide-band acoustic pulse in supercritical mode. Appl. Phys. Lett. 2000, 76(3), 387.
9. A. Merlen, V.L. Preobrazhensky, P. Pernod. Supercritical parametric phase conjugation of ultrasound. Numerical simulation of nonlinear and nonstationary mode. Journ. of the Acoustical Society of America, 2002, 112(6), 2656.
10. O. Bou Matar et. al. Two-dimensional axisymmetric numerical simulation of supercritical phase conjugation of ultrasound in active solid media. Journ. of the Acoustical Society of America 2005, 118 (5), 2880.
11. A. Brysev, L. Krutyansky, P. Pernod, V. Preobrazhensky. Acoustic microscope based on magnetoelastic wave phase conjugators. Appl. Phys. Lett., 2000, 76 (21), 3133.
12. V. L. Preobrazhensky. Волны с параметрически обращенным фронтом: применение в нелинейной акустоскопии и диагностике. Uspekhi Phys. Nauk (review of topical problems) 2006, 176(1), 98.
13. Yu.V. Pyl'nov et. al. Acoustic imaging by second harmonic of phase-conjugate wave in inhomogeneous medium. Appl. Phys. Letts., 2001, 78(4), 553.

Rudenko V. V., Berzhansky V. N., Polulyakh S. N., Pernod P., Preobrazhensky V. L. Parametrical magnetoelastic interaction in porous and composite materials// Uchenye zapiski Tavricheskogo Natsionalnogo Universiteta im. V.I. Vernadskogo. – 2007. – Series «Fizika». – V. 20 (59). – № 1. – P. 128 - 135.

Parametric interaction between electromagnetic pumping field and magnetoelastic oscillations in the Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ (Terfenol-D) based composite and porous ferrite of Fe_{1.943}Ni_{0.945}Co_{0.026}Sm_{0.059}O₄ structure is studied experimentally with the original pulse method. Measured magnetoacoustical parameters including sound velocity sensitivity on pumping AC magnetic field are given. Application of studied materials in ultrasonics for acoustic matching of parametric wave phase conjugators with water is discussed.

Keywords: ferrite, composite, Terfenol-D, parametrical interaction, magnetoelastic coupling.

Руденко В. В., Бержанський В. Н., Полулях С. М., Pernod P., Преображенський В. Л. Параметрична магнітоупруга взаємодія у пористих та композитних матеріалах // Учені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. – 2007. – Серія «Фізика». – Т. 20 (59). – № 1. – С. 128 – 135.

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МАГНИТОУПРУГОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ...

Оригинальным импульсным методом досліджена параметрична взаємодія магнітоупругих коливань з полем магнітного накачування в пористому фериті складу $\text{Fe}_{1.943}\text{Ni}_{0.945}\text{Co}_{0.026}\text{Sm}_{0.059}\text{O}_4$ і композитному матеріалі на основі $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2$. Приведені дані вимірювань магнітоакустичеських параметрів, у т.ч. чутливості швидкості звуку до змінного магнітного поля. Обговорюється можливість застосування таких структур у гідроакустичних системах звернення хвильового фронту.

Ключові слова: ферит, композит, Терфенол-Д, параметрична взаємодія, магнітопружний зв'язок.

Поступила в редакцію 1.03.2007 г.