

**КОРРЕЛЯЦИЯ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО  
И ΔЕ-ЭФФЕКТОВ В  
МАГНИТОСТРИКЦИОННО –  
- ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ  
СТРУКТУРАХ**

Бичурин<sup>1</sup> М.И., Петров<sup>1</sup> В.М.,  
Иванов<sup>1</sup> А.А., Srinivasan<sup>2</sup> G., Nan<sup>3</sup> С.-W.  
<sup>1</sup>Новгородский государственный университет,  
Великий Новгород,  
<sup>2</sup>Oakland University, Rochester, Michigan, USA,  
<sup>3</sup>Tsinghua University, Beijing, China

В данном докладе представлены первые теоретические данные о зависимости магнитоэлектрического (МЭ) эффекта от магнитного поля в области электро-механического (ЭМР) резонанса в магнито-стрикционно-пьезоэлектрических гетероструктурах. Были исследованы трехслойные структуры, состоящие из пермендюра и пьезокерамики ЦТС. Пермендюр (магнитный сплав состава 49 % Со, 49 % Fe и 2 % V) представляет собой идеальный материал для изучения МЭ композитов, поскольку имеет низкое удельное сопротивление, высокую температуру Кюри и высокую магнито-стрикцию. PZT был выбран из-за высоких значений температуры Кюри и пьезоэлектрических констант.

Измерения МЭ коэффициента показали, что сильный МЭ эффект наблюдается в области низких частот (~100 Гц), а гигантский МЭ эффект в области ЭМР [1] на частотах 200-300 кГц для радиальных мод и на частотах ~ 2,7 МГц для толщинных мод. Полученные данные показали, что от смещающего магнитного поля зависят два ключевых параметра: частота ЭМР  $f_r$  и величина резонансного МЭ коэффициента  $\alpha_{E,R}$ . С возрастанием  $H$  возрастает  $f_r$ , что приводит к резкому увеличению, а затем падению  $\alpha_{E,R}$ . В нашей модели мы рассмотрели два механизма влияния магнитного поля на МЭ эффект в области ЭМР:

1. Сдвиг частоты ЭМР, обусловленный изменением коэффициентов упругости (ΔЕ-эффект).

2. Изменение амплитуды сигнала ЭМР, связанное с зависимостью пьезомагнитных коэффициентов от магнитного поля.

МЭ эффект в области ЭМР в радиальных и толщинных модах композитов является эффектом подобным по природе с низкочастотным МЭ эффектом (вынужденная поляризация композита под воздействием переменного магнитного поля), только магнитное поле в этом случае настроено на частоту ЭМР. Динамическая магнито-стрикция ответственна за электромагнитное взаимодействие и в случае ЭМР приводит к существенному увеличению МЭ коэффициента. Сдвиг резонансной частоты в приложенном магнитном поле, приводящем к изменению модуля Юнга, обусловлен ΔЕ-эффектом.

Были изучены трехслойные структуры, состоящие из пермендюра с высокой магнито-стрикцией и сильной пьезомагнитной связью и пьезокерамики ЦТС. Эти структуры изготавливались путем склеивания дисков из пьезокерамики и пермендюра диаметром 9 мм и толщиной 0,18-0,8 мм. Трехслойная структура состояла из центрального диска пьезокерамики, к которому присоединены с помощью эпоксидных сло-

ев толщиной 0,01-0,03 мм внешние диски пермендюра.

МЭ коэффициент  $\alpha_E = \delta E / \delta H$  был определен путем измерения электрического поля, индуцированного перпендикулярно плоскости образца при поле  $\delta H$  (100 Гц – 3 МГц) и смещающем магнитном поле  $H$ . Мы наблюдали резонанс на радиальных и толщинных модах на частотах 200 кГц – 2,7 МГц. Резонансная частота  $f_r$  и пик  $\alpha_E$  были измерены как функции от  $H$ . Сдвиг  $f_r$  наблюдался с увеличением  $H$ . Расчетные значения сдвига  $\delta f_r$  хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Кроме того, МЭ эффект в области ЭМР и его зависимость от ΔЕ-эффекта исследована в трехслойных структурах на основе металлических ферромагнетиков и пьезокерамики ЦТС. Измерения на образцах с пьезокерамикой и Fe, Со и Ni показали наличие сильного МЭ взаимодействия.

В заключение можно сделать следующие выводы. Нашими теоретическими расчетами были предсказаны два механизма влияния подмагничивающего поля на МЭ эффект, обусловленные изменением пьезомагнитного коэффициента и коэффициента упругой деформации. В работе показано, что эти вклады могут быть измерены в отдельности в области электро-механического резонанса.

Данные частотных зависимостей МЭ коэффициентов показали гигантское взаимодействие в области ЭМР на частотах 200-300 кГц для радиальных мод и на частотах порядка 2,7 МГц для толщинных мод. Теоретические модели зависимости МЭ коэффициентов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Полученные результаты могут найти применение при создании устройств обработки сигналов с точной настройкой частоты.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. V.M. Laletin, N.N. Paddubnaya, G.Srinivasan and M.I. Bichurin. Magnetolectric effects in Ferromagnetic metal-piezoelectric Oxide layered structures // Proc. Int. Conf. "Magnetolectric Interaction Phenomena in Crystals" Eds. M. Fiebig et al. Kluwer Acad Publ., 2004, p. 57-63.

**МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ  
В ФЕРРИТ-ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
КОМПОЗИТАХ В ОБЛАСТИ  
МАГНИТОАКУСТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА**

Бичурин<sup>1</sup> М.И., Петров<sup>1</sup> В.М.,  
Рябков<sup>1</sup> О.В., Srinivasan<sup>2</sup> G., Nan<sup>3</sup> С.-W.  
<sup>1</sup>Новгородский государственный университет,  
Великий Новгород,  
<sup>2</sup>Oakland University, Rochester, Michigan, USA,  
<sup>3</sup>Tsinghua University, Beijing, China

В слоистых структурах на основе монокристаллов ферритов и пьезоэлектриков хорошего качества степень магнитного упорядочения может быть достаточно высока, и в материалах такого типа возможно наблюдение эффектов, связанных с магнитоупругим взаимодействием. К динамическим эффектам, рассматриваемым в данной работе, относится магнито-