

Физико-математические науки

**МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ
В ПОРИСТЫХ
ФЕРРИТ-ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
КОМПОЗИТАХ**

Бичурин¹ М.И., Петров¹ В.М., Рябков О.В.,
Иванов А.А., Srinivasan² G., Nan³ С.-W.

¹Новгородский государственный университет,
Великий Новгород,

²Oakland University, Rochester, Michigan, USA,

³Tsinghua University, Beijing, China

Феррит-пьезоэлектрические композиты проявляют магнитоэлектрические (МЭ) свойства. Эти свойства определяются механическими, магнитными и электрическими параметрами исходных компонент и их объемными долями. Объемные композиты отличаются от слоистых структур более высокой механической прочностью. В данной работе рассматривается влияние пористости объемного композита на МЭ эффект.

Исследуемый композит состоит из пьезоэлектрической и магнитоэлектрической подсистем, разделенных порами. Для нахождения эффективных параметров композита (пьезоэлектрический модуль, магнитоэлектрические коэффициенты, упругие податливости, МЭ коэффициент) используются уравнения эластостатики, электростатики и магнитоэластики. Выражения для низкочастотных продольного и поперечного МЭ коэффициентов получены для образцов композитов, характеризующихся типами связности 3-0-0 и 0-3-0 [1].

Концентрационная зависимость МЭ коэффициентов определяется типом связности. Величина МЭ эффекта зависит от пористости образца. Известны результаты измерений МЭ коэффициентов для спеченных композитов с магнитоэлектрической компонентой CoFe_2O_4 или $(\text{Ni}, \text{Co}) \text{Fe}_2\text{O}_4$ и пьезоэлектрической компонентой BaTiO_3 или ЦТС. Измеренный МЭ коэффициент по напряжению α_E , равный отношению напряженности индуцированного электрического поля к напряженности приложенного магнитного поля, оказался по величине меньше, чем расчетное значение, вследствие (i) неполной поляризации пьезоэлектрической фазы из-за шунтирования пьезоэлектрической фазы низким сопротивлением магнитоэлектрической фазы; (ii) наличия ионов Fe^{2+} в ферритовой фазе, приводящего к увеличению тока утечки; (iii) появления микротрещин при термическом расширении из-за несоответствия между механическими свойствами двух фаз; (iv) пористости образца.

Современные технологии позволяют синтезировать композиты, не содержащие включений и химических неоднородностей. Использование метода горячего прессования при относительно низких температурах позволяет предотвратить образование ионов Fe^{2+} и получить образцы с высоким электрическим сопротивлением. Кроме того, имеется возможность контролировать параметры, определяющие МЭ взаимодействие, такие как начальная магнитная проницаемость и пьезомагнитные коэффициенты, зависящие от размера зерен и плотности.

Результаты проведенных исследований показали, что МЭ эффект в образцах, изготовленных горячим прессованием, сильнее, чем в спеченных композитах. В области электромеханического резонанса наблюдается существенное увеличение МЭ коэффициента. МЭ коэффициент по напряжению α_E возрастает с возрастанием подмагничивающего поля до максимума, а затем резко падает. Максимум поперечного МЭ коэффициента наблюдается при величине подмагничивающего поля значительно меньшей, чем для продольного МЭ коэффициента, вследствие отсутствия размагничивающего поля для поперечной ориентации. Зависимость α_E от величины подмагничивающего поля определяется зависимостью пьезомагнитного модуля $q = \delta\lambda/\delta H$, где λ – магнитоэлектрическая деформация. Насыщение λ в высоких полях приводит к $\alpha_E = 0$.

Сравнение α_E для образцов, изготовленных различными методами, показывает, что образцы, изготовленные спеканием, имеют очень низкий $\alpha_E = 1-3$ мВ/А. Это связано с низким удельным электрическим сопротивлением 10^4-10^6 Ом·см и большим суммарным током утечки. Спеченные образцы обладают высокой пористостью 15-25%. Комбинация низкого удельного сопротивления и высокой пористости приводит к снижению МЭ эффекта. У образцов, полученных горячим прессованием, МЭ коэффициент по напряжению достигает величины 45 мВ/А. Это связано с высоким удельным сопротивлением и низкой пористостью. Расчетные значения МЭ коэффициентов довольно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Таким образом, в данной работе показано, что МЭ коэффициент по напряжению слабо зависит от пористости образца: при объемной доле пор 20 % величина МЭ коэффициента уменьшилась приблизительно на 17 %. Композиты, полученные методом горячего прессования, имеют значительно более сильный МЭ эффект, чем подобные композиты, изготовленные по традиционной технологии спекания. В области электромеханического резонанса наблюдается значительное усиление МЭ эффекта. Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации технологических процессов изготовления феррит-пьезоэлектрических композитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V.M. Petrov, M.I. Bichurin, V.M. Laletin, N.N. Paddubnaya and G.Srinivasan. Modeling of Magnetolectric effects in Ferromagnetic / piezoelectric Bulk Composites // Proc. Int. Conf. "Magnetolectric Interaction Phenomena in Crystals" Eds. M. Fiebig et al. Kluwer Acad Publ., 2004, p. 65-70.

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

Бичурин¹ М.И., Петров¹ В.М.,
Иванов¹ А.А., Srinivasan² G., Nan³ С.-W.
¹Новгородский государственный университет,
Великий Новгород,
²Oakland University, Rochester, Michigan, USA,
³Tsinghua 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 δH (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 α_E были измерены как функции от H . Сдвиг f_r наблюдался с увеличением H . Расчетные значения сдвига δf_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**

Бичурин¹ М.И., Петров¹ В.М.,
Рябков¹ О.В., Srinivasan² G., Nan³ С.-W.
¹Новгородский государственный университет,
Великий Новгород,
²Oakland University, Rochester, Michigan, USA,
³Tsinghua 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-