

**ВЛИЯНИЕ  $\Delta E$ - ЭФФЕКТА НА ПОЛЕВУЮ ЗАВИСИМОСТЬ  
РЕЗОНАНСНОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА**

<sup>1</sup>Лалетин В.М., <sup>2</sup>Филиппов Д.А.

<sup>1</sup>ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси»,  
г. Витебск, Беларусь, E-mail: laletin57@rambler.ru

<sup>2</sup>«Новгородский государственный университет», г. Великий Новгород, Россия

**Введение**

Магнитоэлектрические (МЭ) композиционные материалы представляют собой структуры, состоящие из двух фаз – магнитострикционной и пьезоэлектрической. Наблюдающийся МЭ эффект является результатом механического взаимодействия составляющих компонент [1], поэтому в области электромеханического резонанса его величина резко возрастает. Впервые измерения МЭ сигнала в области резонанса проведены в PhilipsResearchLaboratory в 1978 г. [2]. Однако резонанс в этой работе использовался лишь как метод выделения полезного сигнала на фоне помех. Только спустя четверть века впервые были проведены детальные исследования частотной зависимости МЭ эффекта в области резонанса [3]. В настоящее время эти исследования стали неотъемлемой частью изучения новых МЭ материалов. Обычно исследования ограничиваются измерением частотной зависимости МЭ коэффициента при величине подмагничивающего поля, соответствующего максимальному пьезомагнитному коэффициенту. Однако наличие  $\Delta E$ -эффекта в магнитном материале приводит к существованию зависимости резонансной частоты МЭ коэффициента от величины магнитного поля. Следовательно, полевая зависимость резонансного МЭ коэффициента будет определяться не только величиной пьезомагнитного коэффициента и добротностью резонатора, но на нее также будет оказывать влияние  $\Delta E$ -эффект. Целью данной работы явилось исследование полевой зависимости МЭ коэффициента, полученной при различных частотах в области электромеханического резонанса.

**Материалы и методы исследования**

Для проведения исследований использовался объемный композиционный материал состава: ЦТС23 – 50 масс.%,  $\text{NiFe}_{1,9}\text{Co}_{0,02}\text{O}_4$  – 50 масс.% с добавлением  $\text{TiO}_2$  в количестве 1,5 масс.%. Образцы спекали в тигле со свинец содержащей засыпкой в течение двух часов при температуре  $1240^\circ\text{C}$ . Electrodes наносили путем вжигания серебряной пасты при температуре  $650^\circ\text{C}$  в течение 20 минут. Образцы имели форму дисков диаметром 8,7 – 8,8 мм и толщиной 0,8 – 0,9 мм. Поляризацию материалов осуществляли при температуре  $80^\circ\text{C}$  в течение двух часов в электрическом поле 4 кВ/мм с последующим охлаждением в этом поле до комнатной температуры.

Для исследования резонансного МЭ эффекта использовался метод, основанный на регистрации переменного напряжения, возникающего на электродах образца при наложении на него переменного и постоянного магнитных полей. В эксперименте исследовался поперечный МЭ эффект, при котором переменное и постоянное магнитные поля располагались перпендикулярно вектору поляризации.

МЭ коэффициент по напряжению рассчитывался по формуле

$$\alpha_E = u/(h \cdot t),$$

где  $u$  – напряжение, возникающее на электродах образца,  $h$  – напряженность переменного магнитного поля,  $t$  – толщина образца.

**Результаты исследования и их обсуждение**

Исследования полевой зависимости МЭ коэффициента в области электромеханического резонанса показали, что полученные результаты можно разбить на две группы – полевые зависимости на частотах выше и ниже основной резонансной частоты. Основная резонансная частота соответствует значению подмагничивающего поля, при котором наблюдается максимальный МЭ коэффициент на низких частотах, и в нашем случае составляла 381,56 кГц.

На рисунке 1 представлены полевые зависимости МЭ коэффициента, полученные на частотах 381,56 кГц (кривая 1), 381,76 кГц (кривая 2), 382,06 кГц (кривая 3), 382,56 кГц (кривая 4) и в режиме непрерывной настройки на резонансную частоту (кривая 5). Полевые зависимости на частотах свыше 381,56 кГц имеют аномальный вид, характеризующийся четко выраженным максимумом, который с увеличением частоты уменьшается. Интересный результат получен при измерении полевой зависимости на частоте 382,56 кГц. В интервале значений магнитного поля от 36 кА/м до 80 кА/м величина МЭ сигнала постоянная.

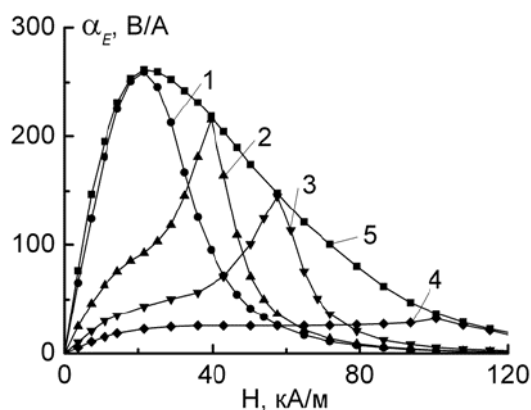


Рисунок 1 – Полевые зависимости МЭ коэффициента, полученные на частотах 381,56 кГц (1), 381,76 кГц (2), 382,06 кГц (3), 382,56 кГц (4) и в режиме непрерывной настройки на резонансную частоту (5)

Рассмотрим вначале влияние магнитного поля на резонансную частоту образца (рис. 2). Как видно из рисунка, минимум резонансной частоты совпадает с основной резонансной частотой и наблюдается в магнитных полях 18 – 22 кА/м. При исследовании полевой зависимости МЭ коэффициента на частотах, превышающих основную резонансную частоту (381,76кГц, 382,06кГц, 382,56кГц), значения их подмагничивающих полей попадают в область полевой зависимости резонансной частоты. Это приводит к возникновению пика на полевой зависимости, величина которого будет определяться полевой зависимостью резонансного МЭ коэффициента, полученного в режиме непрерывной настройки на резонансную частоту. Отсутствие пика на полевой зависимости МЭ коэффициента, полученного на частоте 381,56кГц, объясняется тем, что основная резонансная частота находится в точке перегиба кривой зависимости резонансной частоты от магнитного поля. Наличие плато в области магнитного поля от 36кА/м до 80кА/м (рис. 1, кривая 4), по-видимому, объясняется наложением ряда эффектов: зависимостью пьезомагнитного коэффициента и МЭ резонанса от магнитного поля,  $\Delta E$ -эффектом.

Результаты исследований полевых зависимостей МЭ коэффициента на частотах, меньше основной резонансной частоты 381,46кГц (кривая 2), 381,36 кГц (кривая 3), 381,06 кГц (кривая 4), представлены на рисунке 3. Во всех случаях полевая зависимость имеет типичный вид, свойственный МЭ композитам. По-видимому, это объясняется тем, что данные частоты не попадают в область  $\Delta E$ -эффекта и в этом случае происходит резонансное усиление сигнала, величина которого будет зависеть от рассогласования резонансной частоты и добротности резонатора.

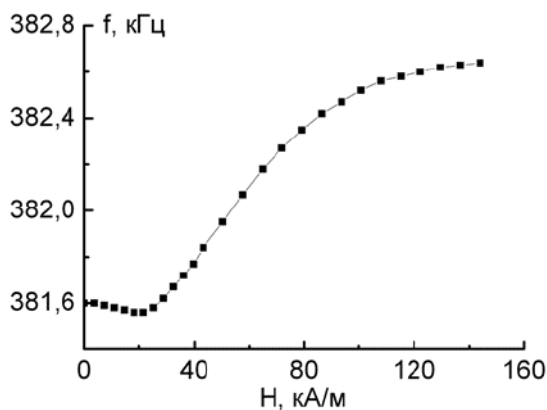


Рисунок 2 – Полевая зависимость резонансной частоты

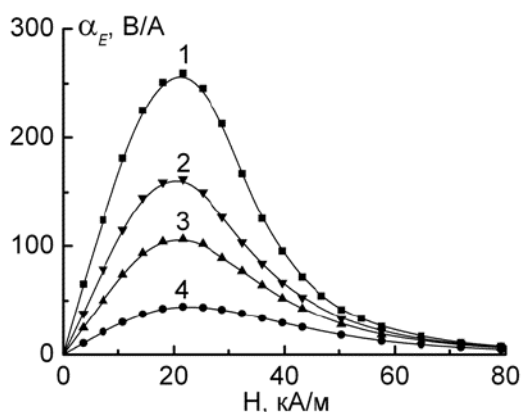


Рисунок 3 – Полевые зависимости МЭ коэффициента по напряжению, полученные на частотах 381,56 кГц (1), 381,46 кГц (2), 381,36 кГц (3) и 381,06 кГц (4)

### Выводы

Исследована полевая зависимость МЭ коэффициента в области электромеханического резонанса. На частотах выше основной резонансной частоты полевая зависимость МЭ коэффициента имеет аномальный вид. На частотах ниже основной резонансной частоты полевая зависимость МЭ коэффициента имеет типичный вид, свойственный композиционным материалам. Это обусловлено влиянием  $\Delta E$ -эффекта на резонансную частоту МЭ эффекта.

Работа выполнена при поддержке гранта совместного конкурса РФФИ – БРФФИ: Российский проект № 16-52-00184 и Белорусский проект № Ф16Р-130.

### Список литературы:

1. Van Suchtelen. Product properties: a new application of composite materials / Van Suchtelen // Philips Res. Rep. – 1972. – V.27. – P.28–37.
2. Run van A.M.J.G. An in situ grown eutectic magnetoelectric composite material. Part 2. Physical properties / Van A.M.J.G. Run, D.R. Terrel, J.H. Schooling // J. Mater. Sci. – 1974. – V.9. – P.1710-1714.
3. Bichurin M.I. Resonance magnetoelectric effects in layered magnetostrictive-piezoelectric composites /M.I. Bichurin, D.A. Filippov, V.M. Petrov, G. Srinivasan, V.M. Laletin, N.N. Paddubnaya // Physical Review B. – 2003. – V.68. – P.132408.