

**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-

электрический (МЭ) эффект, заключающийся в индуцировании электрического поля во внешнем магнитном поле. В области наложения частот электромеханического и магнитного резонансов можно ожидать значительное усиление этого эффекта. В данной работе рассматривается МЭ эффект в слоистой (на основе монокристаллов) структуре феррит никеля – цирко-

нат-титанат свинца в области магнитоакустического резонанса.

Для теоретического анализа распространения магнитоупругих волн использован феноменологический подход, поскольку он позволяет получить практически все основные результаты.



Рисунок 1. Двухслойная феррит-пьезоэлектрическая структура. \mathbf{P} – вектор поляризации пьезоэлектрика, \mathbf{H}_0 – подмагничивающее поле. Переменное поле \mathbf{H} направлено перпендикулярно плоскости рисунка

Рассмотрим двухслойную феррит - пьезоэлектрическую структуру в форме пластинки. Будем считать, что постоянное магнитное поле \mathbf{H}_0 параллельно плоскости пластинки, а переменное магнитное поле также параллельно этой плоскости и перпендикулярно \mathbf{H}_0 . Вектор поляризации пьезоэлектрического слоя направлен перпендикулярно плоскости пластинки. Предполагается, что ферритовая компонента композита находится в насыщенном (однодоменном) состоянии. Это состояние имеет два важных преимущества. Во-первых, когда имеются домены, акустические потери на высоких частотах слишком велики. Во-вторых, большая восприимчивость при низких частотах в результате процесса релаксации уменьшается при повышении частоты, и в насыщенных образ-

цах ферромагнитный резонанс становится единственным путем получения больших эффективных восприимчивостей. Плотность свободной энергии монокристаллической ферритовой фазы мы представили в виде

$${}^m W = W_H + W_{an} + W_{ma} + W_{ac} + W_{af},$$

где W_H – энергия Зеемана,

W_{an} – энергия кубической кристаллографической анизотропии,

W_{ma} – магнитоупругая энергия,

W_{ac} – упругая энергия,

W_{af} – энергия анизотропии формы.

Уравнения движения ферритовой и пьезоэлектрической фаз композита могут быть записаны так:

$$\partial^2({}^m u_1)/\partial t^2 = \partial^2({}^m W)/(\partial x \partial^m S_1) + \partial^2({}^m W)/(\partial y \partial^m S_6) + \partial^2({}^m W)/(\partial z \partial^m S_5),$$

$$\partial^2({}^p u_1)/\partial t^2 = \partial({}^m T_1)/\partial x + \partial({}^m T_1)/\partial y + \partial({}^m T_1)/\partial z,$$

$$\partial^2({}^p u_2)/\partial t^2 = \partial({}^m T_2)/\partial x + \partial({}^m T_2)/\partial y + \partial({}^m T_2)/\partial z.$$

где ${}^m u_i$, ${}^p u_i$ – смещения, ${}^m S_i$ – деформации, ${}^m T_i$ – механические напряжения.

Верхний индекс p соответствует пьезоэлектрической фазе, m – ферритовой.

Уравнения движения вектора намагниченности имеет вид

$$\partial \mathbf{M} / \partial t = -\gamma [\mathbf{M}, \mathbf{H}_{\text{eff}}],$$

$$\text{где } \mathbf{H}_{\text{eff}} = -\partial({}^m W) / \partial \mathbf{M},$$

где \mathbf{M} – намагниченность ферритовой фазы, \mathbf{H}_{eff} – эффективное поле,

Индукцированное в пьезоэлектрической компоненте электрическое поле определяется из условия разомкнутой цепи, т. е. равенства нулю среднего значения электрической индукции в пьезоэлектрическом слое:

$$D = \frac{1}{pL} \int_{-pL}^0 D dz = 0,$$

где под знаком интеграла стоит электрическая индукция в пьезоэлектрическом слое, а pL – толщина пьезоэлектрического слоя. Электрическая индукция в пьезоэлектрическом слое может быть найдена путем совместного решения уравнений движения среды, а также уравнения движения вектора намагниченности ферритовой фазы с учетом граничных условий.

В работе получены следующие основные результаты.

1. Проведен теоретический анализ МЭ эффекта в слоистой феррит-пьезоэлектрической структуре в области магнитоакустического резонанса.

2. Обнаружена резонансная зависимость МЭ коэффициента по напряжению композиционных фер-

рит-пьезоэлектрических материалов в области магнитоакустического резонанса при совпадении частот электромеханического резонанса и однородной прецессии намагниченности ферритовой фазы.

3. Расчетное значение МЭ коэффициента по напряжению для композита на основе феррита никеля и цирконата-титаната свинца в области магнитоакустического резонанса составляет 200 В/А.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании устройств твердотельной электроники, работа которых основана на генерации поверхностных акустических волн или на управлении параметрами магнитного резонанса с помощью электрического поля.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ АТОМ-АТОМНЫХ И ИОН-АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

Кашуба А.С., Курсков С.Ю., Хахаев А.Д.
Петрозаводский государственный университет,
Петрозаводск

Рассматриваемый экспериментальный комплекс с удаленным доступом предназначен для изучения процессов возбуждения при атом-атомных и ион-атомных столкновениях с участием инертных газов в диапазоне энергий налетающих частиц от 50 до 1000 эВ. Он позволяет методами оптической спектроскопии определять полные сечения возбуждения атомных уровней, поляризацию излучения сталкивающихся частиц, а также исследовать возбуждаемый спектр при взаимодействии пучка быстрых атомов или ионов с газовой мишенью в условиях парных столкновений.

Экспериментальный комплекс состоит из следующих функциональных модулей:

- газоразрядного источника ионов и быстрых атомов с многоканальной камерой перезарядки;
- детектора нейтральных и заряженных частиц, позволяющего контролировать коэффициенты вторичной электронной эмиссии под действием ионов и быстрых атомов с поверхности детектора в ходе эксперимента;
- времяпролетного масс-спектрометра (для энергетического анализа и контроля состава пучков ионов и нейтральных частиц);
- системы регистрации оптического излучения возбужденных атомов и ионов на базе монохроматора МДР-2 и ФЭУ-106,-62;
- вакуумной установки на базе диффузионных паромасляных насосов.

Комплекс имеет следующие параметры. Плотность потока быстрых частиц достигает $3 \cdot 10^{18}$ част/($\text{с}^2 \text{ м}$) (пучок быстрых атомов создается путем симметричной резонансной перезарядки ионов на собственном газе). Угловая расходимость пучка не превышает $3 \cdot 10^{-4}$ ср. Энергетический разброс ионов и атомов составляет соответственно 5 ± 1 и 11 ± 3 эВ. Количество метастабильных атомов гелия в $2^{1,3}\text{S}$ -состояниях не превышает 0.6% от полного числа быстрых частиц, число метастабильных атомов неона в $3s[3/2]_2^0$ -состоянии составляет 0.3% от числа быстрых атомов (измерения выполнены методами фотоионизации и флуоресцентной лазерной спектроскопии). Спектральный диапазон системы регистрации оптического излучения – от 200 до 1100 нм. Для уменьшения скорости счета темновых импульсов ФЭУ охлаждается до -15°C . Давление газа-мишени – не более $1 \cdot 10^{-3}$ Тор. Давление остаточного газа в камере столкновений не превышает $1 \cdot 10^{-6}$ Тор.

Для управления экспериментом на базе установки создана распределенная информационно - измерительная система, обеспечивающая удаленный доступ к ресурсам комплекса в сетях, функционирующих на базе стека протоколов ТСР/Р. Доступ к физическому оборудованию осуществляется с помощью серверов стандартных приборных интерфейсов (КАМАК, GPIB), сервера доступа к микроконтроллерам MCS-196, а также коммуникационного сервера, интегрирующего серверы оборудования в единую информационно-измерительную систему [1].

Комплект программ-клиентов включает программу измерения сечений возбуждения спектральных линий при взаимодействии ионов и быстрых атомов с газовой мишенью в зависимости от энергии сталкивающихся частиц, программу измерения спектров излучения атомных частиц, программу определения абсолютной чувствительности системы регистрации оптического сигнала, программу градуировки дифракционного монохроматора по длинам волн и программу измерения коэффициентов вторичной электронной эмиссии с поверхности детектора под действием ионов и быстрых атомов.

С помощью экспериментального комплекса методами оптической спектроскопии в системе Ne-Ne были исследованы спектры и сечения возбуждения группы состояний $\text{Ne}(2p^5np)$ ($3 \leq n \leq 8$), получены спектры возбуждения при столкновениях атомов аргона низких энергий (рис.1), изучены сериальные закономерности в системе Ar-Ag [2, 3].

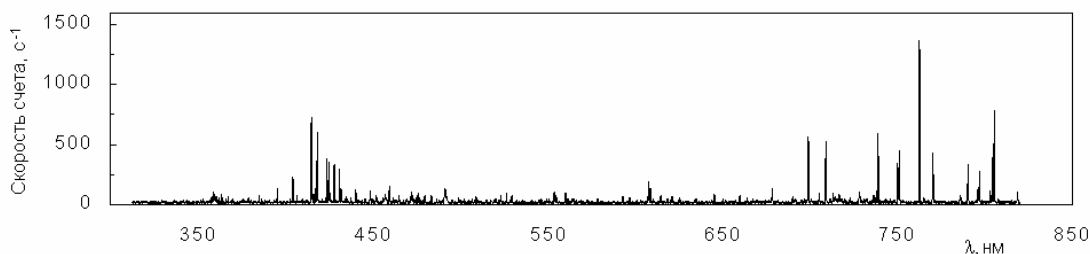


Рисунок 1. Спектр Ar I при энергии столкновения атомов аргона 450 эВ (с.д.м.)