

6 – Магнетизм

Ибрагимова Алина Рамилевна, 4 курс

Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт

Влияние магнитного поля на структуру и свойства 0° доменных границ в одноосных пленках с флексомагнитоэлектрическим эффектом.

Вахитов Роберт Миннисламович, д.ф.-м.н.

e-mail: alya.nizyamova.96@mail.ru стр. 117

Иванов Сергей Вадимович, магистрант 1 года обучения

Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, отделение электроники

Исследование неоднородных магнитоэлектрических композитов

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

e-mail: sivanovvad@mail.ru стр. 117

Иванов Станислав Олегович, магистрант 2 года обучения

Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, институт электронных и информационных систем

Исследование способа поляризации пьезоэлектрических материалов

Семёнов Геннадий Алексеевич, к.ф.-м.н.

e-mail: staskarta@mail.ru стр. 119

Ивашева Елена Евгеньевна, 4 курс

Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, институт конструирования и технологии электронных средств

Разработка и исследование магнитоэлектрической структуры на основе волокон из аморфного сплава и ЦТС-19

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

e-mail: ellen9879@yandex.ru стр. 120

Ильсова Галия Флюсовна, ассистент

Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт

Структура и свойства кл -скирмионов в неоднородных ферромагнитных пленках

Вахитов Роберт Миннисламович, д.ф.-м.н.

e-mail: galiya.siraeva2014@yandex.ru стр. 122

Карева Катерина Валерьевна, аспирант 3 года обучения

Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, радиофизический факультет

Комплексное исследование свойств замещенной никелевой шпинели, полученной по короткой технологической схеме

Вагнер Дмитрий Викторович, к.т.н.

e-mail: katkareva1@gmail.com стр. 123

Кафаров Руслан Гайдарович, 4 курс

Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, институт конструирования и технологии электронных средств

Перестраиваемый полосно-пропускающий СВЧ фильтр на магнитоэлектрических резонаторах

Лобекин Вячеслав Николаевич

e-mail: evraudx14@gmail.com стр. 124

Козонов Александр Юрьевич, 2 курс

Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, отделение электроники

Магнитоэлектрический датчик магнитного поля на основе магнитоэлектрически-пьезоэлектрической структуры

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

e-mail: s241716@std.novsu.ru стр. 126

Косырев Леонид Николаевич, 10 класс
Красноярск, МАОУ СШ № 72 им. М.Н. Толстихина
Магнитные свойства многослойных наноструктур на основе Co и Ni
Косырев Николай Николаевич, к.ф.-м.н.
e-mail: leonidkosyrev752@gmail.com стр. 128

Марков Иван Юрьевич, 4 курс
Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, конструирования и технологии электронных средств
Исследование магнитоэлектрических градиентных структур PZT/Metglas/Ni
Бичурин Мирза Имамovich, д.ф.-м.н.
e-mail: ivanmarckov02@mail.ru стр. 129

Сердюк Анастасия Андреевна, 4 курс
Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт инженерной физики и радиоэлектроники
Наночастицы семейства ферритов $Co_{1-x}Mg_xFe_2O_4$: магнитные свойства и применение
Эдельман Ирина Самсоновна, д.ф.-м.н.
e-mail: Onyoursde4@gmail.com стр. 130

Сыроварова Кристина Андреевна, 2 курс
Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, отделение электроники
Исследование формирования магнитоэлектрических структур методом магнетронного распыления
Бичурин Мирза Имамovich, д.ф.-м.н.
e-mail: crstnaa@icloud.com стр. 132

Торопова Екатерина Сергеевна, магистрант 1 года обучения
Красноярск, Сибирский федеральный университет, радиофизический факультет
Влияние термообработки на структуру и свойства наночастиц $Fe_{0.55}Co_{2.45}O_4$
Эдельман Ирина Самсоновна, д.ф.-м.н.
e-mail: topotova2002@gmail.com стр. 133

Влияние магнитного поля на структуру и свойства 0° доменных границ в одноосных пленках с флексомагнитоэлектрическим эффектом

Ибрагимова Алина Рамилевна

Вахитов Роберт Миннисламович, Солонецкий Ростислав Владимирович

Уфимский университет науки и технологий

Вахитов Роберт Миннисламович

alya.nizyamova.96@mail.ru

В настоящее время одним из перспективных направлений в развитии наномagnetизма, тесно связанной с разработками различных устройств спинтроники, считается исследования магнитоэлектрических материалов [1,2]. Они характеризуются двумя и более параметрами порядка и обладают рядом интересных и необычных свойств. В частности, к ним относится и обнаруженное в пленках ферритов-гранатов при комнатных температурах явление смещения доменных границ (ДГ) под действием неоднородного электрического поля [2]. Было высказано предположение, что данное явление обусловлено наличием в пленках неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия (флексомагнитоэлектрический эффект [1]), которое подтвердилось в ходе дальнейших исследований [3]. В частности, в работе [4] был проведен теоретический анализ микромагнитных структур, возможных в тонких пленках с флексомагнитоэлектрическим (ФМЭ) взаимодействием и показано, что в них наряду с 180° ДГ могут существовать как устойчивые образования, еще два типа ДГ: 0° ДГ с квазиблоховской структурой и 0° ДГ типа Нееля. Они характеризуются нетривиальными свойствами, но пока мало изучены, а экспериментально не были обнаружены [2]. В частности, первый тип 0° ДГ может зародиться только при больших значениях электрического поля, значительно превышающих их характерные значения, а у второго типа структура ДГ такова, что образующиеся заряды в области ДГ экранируют друг друга (интегральная величина поляризации равна нулю). Поэтому представляет собой интерес исследования влияния магнитного поля на условия зарождения, структуру и полярность 0° ДГ в рассматриваемой пленке (как внешнего фактора с потенциальными возможностями изменения их свойств).

Численный анализ уравнений Эйлера-Лагранжа показал, что наличие магнитного поля существенно изменяет структуру и свойства 0° ДГ обоих типов. При этом для каждого типа 0° ДГ всегда существует такое направление магнитного поля, при котором возрастает величина интегральной поляризации. В частности, в случае 0° ДГ квазиблоховского типа эффект увеличения интегральной поляризации (т.е. усиления ФМЭ эффекта) можно достичь в слабых магнитных полях в случае, когда $\mathbf{H} \parallel \mathbf{Oz}$. Однако при этом электрическое поле должно быть не малым. Кроме того, действием магнитного поля на квазиблоховскую 0° ДГ можно изменить критическое поле зарождения в ту или иную сторону и даже достичь того, чтобы отсутствовал порог её зарождения. В случае, когда $\mathbf{H} \parallel \mathbf{Oy}$ структура 0° ДГ существенно трансформируется: характер распределения вектора намагниченности становится ассиметричным.

Во втором случае, если внешнее магнитное поле \mathbf{H} направлено вдоль оси Ox , то тогда (и только в этом случае) может возникнуть ФМЭ эффект, достаточный для его наблюдения в экспериментальных условиях.

Список публикаций:

[1] Pyatakov A. P., Zvezdin A. K. // *Phys. Usp.*, 55, 2012

[2] Logginov A.S. et al. // *JETP Letters*, 86, 2007

[3] Veshchunov I. S. et al. // *Phys.Rev.Lett.*, 115, 027601 (2015)

[4] Maksutova F.A., Pyatakov A.P., Vakhitov R.M., Solonetskiy R.V. // *EPL*. 129, 27004 (2020)

Исследование неоднородных магнитоэлектрических композитов

Иванов Сергей Вадимович

Соколов Олег Владимирович

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Имамович

sivanovvad@mail.ru

Неоднородным магнитоэлектрическим (МЭ) композитом считается композит, длина или ширина пьезоэлектрической и магнитострикционной фаз которого не равны. Ранее были исследованы неоднородные МЭ композиты с длиной магнитострикционного материала большей, чем длина пьезоэлектрика [2]. Также были проведены исследования для обратного случая: применялся пьезоэлектрик с длиной больше, чем магнитострикционный материал [3]. В данном исследовании планируется определить теоретическую зависимость обратного МЭ коэффициента и прямого МЭ коэффициента от разности длин фаз трехслойного симметричного МЭ композита АМАГ-225/ЦТС-19/АМАГ-225 (рис. 1).

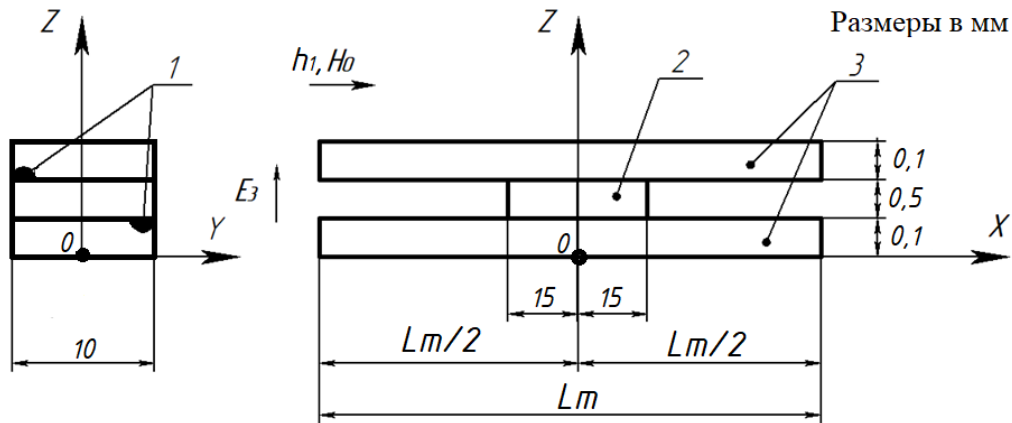


рис. 1 Эскиз исследуемого неоднородного симметричного МЭ композита.

На рис. 1: 1 – электроды, соединенные с пьезоэлектриком, для подключения МЭ композита к генератору или нагрузке, 2 – пьезоэлектрическая фаза (ЦТС-19), 3 – магнитострикционная фаза (АМАГ-225), $H_0 = 6,5$ (Э) – внешнее постоянное подмагничивающее поле, E_3 – переменная напряженность электрического поля в пьезоэлектрике композита, h_1 – переменное магнитное поле, приложенное к магнитострикционной фазе композита, L_m – длина магнитострикционной фазы композита.

Функциональные свойства МЭ композитов определяются обратным МЭ коэффициентом в случае обратного МЭ эффекта и МЭ коэффициентом по напряжению в случае прямого МЭ эффекта [1]. Теоретические расчеты зависимости обратного МЭ коэффициента от частоты переменного электрического поля E_3 и зависимости МЭ коэффициента по напряжению от частоты переменного магнитного поля h_1 выполнены по методике, приведенной в работе [4]. В ходе расчета МЭ композит (рис. 1), был условно разделен на три участка: участок без ЦТС-19, участок с ЦТС-19 и АМАГ-225, участок без ЦТС-19. Затем с помощью материальных уравнений для каждого участка были определены выражения для расчета частотной зависимости переменной магнитной индукции, возникающей в композите в случае обратного МЭ эффекта, и переменного электрического поля в композите, возникающего в случае прямого МЭ эффекта. В итоге с помощью ранее определенных частотных зависимостей переменной магнитной индукции и переменного электрического поля была найдена теоретическая частотная зависимость МЭ коэффициентов для неоднородных МЭ композитов (рис. 1), для продольной моды колебаний свободного композита. На частоте электромеханического резонанса (ЭМР) значения МЭ коэффициентов становятся максимальными.

Чтобы найти теоретическую зависимость резонансного значения МЭ коэффициентов от разности длин фаз были определены резонансные значения для композитов с длиной ЦТС-19, равной 30 мм, и различной длиной АМАГ-225 в диапазоне от 30 мм до 180 мм, изменяющейся с шагом 5 мм. Результаты проведенных теоретических расчетов представлены на рис. 2. На рис. 2: точки – рассчитанные резонансные значения МЭ коэффициентов, линия – аппроксимирующая функция восьмого порядка, полученная с помощью метода наименьших квадратов в программе Maple.

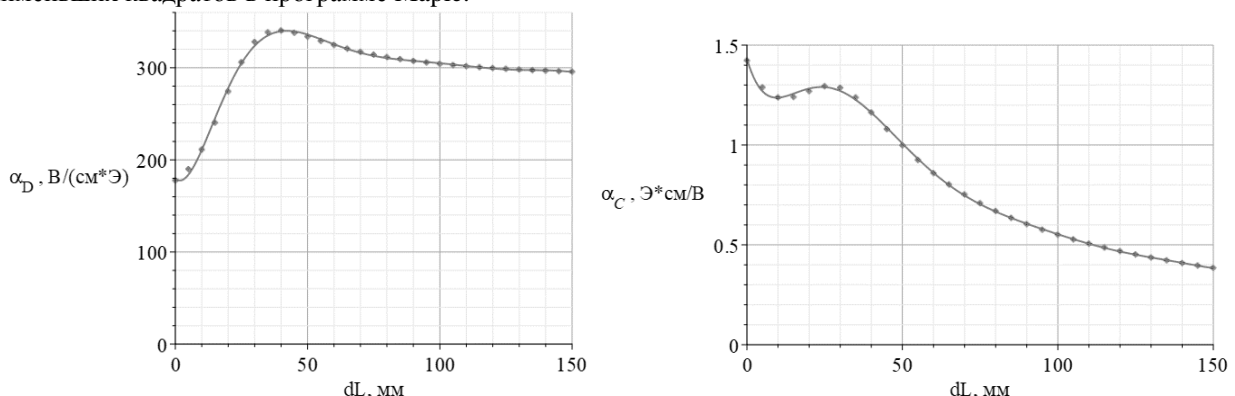


рис. 2 Теоретическая зависимость прямого α_D и обратного α_C МЭ коэффициентов от разности длин магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз композита при постоянной длине пьезоэлектрика 30 мм и на резонансной частоте для каждой длины магнитострикционной фазы. Продольная мода, свободный симметричный МЭ композит.

Согласно проведенным расчетам, при постоянной длине пьезоэлектрика композита АМАГ-225/ЦТС-19/АМАГ-225 резонансные значения обратного МЭ коэффициента уменьшаются при возрастании разности

длин фаз неоднородного МЭ композита, при этом МЭ коэффициент по напряжению принимает максимальное резонансное значение при разности длин фаз, равной 40 мм. Данные выводы можно использовать при проектировании различных устройств на основе МЭ эффекта, которые могут обладать большой чувствительностью и небольшими габаритными размерами: датчики магнитного поля, фильтры, генераторы, фазовращатели, гираторы, антенны и т. д. В будущих исследованиях планируется проверить данные теоретические результаты на практике.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № No 24–15–20044.

Список публикаций:

[1] Bichurin, M.I.; Petrov, V.M.; Petrov, R.V.; Tatarenko, A.S. *Magnetolectric Composites*; Pan Stanford Publishing Pte. Ltd.: Singapore, 2019; 280 p.

[2] Cunzhen Dong, Yifan He, Menghui Li, Cheng Tu, Zhaoqiang Chu, Xianfeng Liang, Huaihao Chen, Yuyi Wei, Mohsen Zaeimbashi, Xinjun Wang, Hwaider Lin, Yuan Gao, and Nian X. Sun. *A Portable Very Low Frequency (VLF) Communication System Based on Acoustically Actuated Magnetolectric Antennas*. *IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS*, VOL. 19, NO. 3, MARCH 2020.

[3] А.В. Калгин, С.А. Гриднев, З.Н. Грибе. Особенности обратного магнитоэлектрического эффекта в двухслойных композитах Tb_{0.12}Dy_{0.2}Fe_{0.68}-PbZr_{0.53}Ti_{0.47}O₃. *Физика твердого тела*, 2014, том 56, вып., с. 1278–1283.

[4] Bichurin, M.; Sokolov, O.; Ivanov, S.; Leontiev, V.; Petrov, D.; Semenov, G.; Lobekin, V. *Physics of Composites for Low-Frequency Magnetolectric Devices*. *Sensors* 2022, 22, 4818. <https://doi.org/10.3390/s22134818>

Исследование способа поляризации пьезоэлектрических материалов

Иванов Станислав Олегович

Институт электронных и информационных систем

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Семенов Геннадий Алексеевич, к.т.н.

staskarta@mail.ru

Поляризация пьезоэлектрических материалов является важным процессом, который используется в различных областях науки и техники. Пьезоэлектрические материалы обладают способностью преобразовывать механическую энергию в электрическую и наоборот. Это свойство используется в пьезоэлектрических преобразователях, которые широко применяются в ультразвуковых исследованиях, датчиках давления, акселерометрах и других устройствах. Однако, для эффективной работы таких устройств необходимо правильно поляризовать пьезоэлектрический материал, что является сложной задачей, требующей тщательного изучения и анализа. Наши исследования поляризации образцов связаны с созданием магнитоэлектрических слоистых структур на основе поляризованной пьезоэлектрической керамики PZT-5Н [1].

В данной статье мы рассмотрим теоретические основы поляризации пьезоэлектрических материалов, а также проведем экспериментальное исследование различных методов поляризации и сравним их эффективность.

Теоретические основы

Пьезоэлектрический эффект – это явление возникновения электрических зарядов на поверхности диэлектрика под действием механических напряжений. И наоборот, механическое напряжение может возникать при приложении электрического поля. Это явление обусловлено тем, что в некоторых кристаллических диэлектриках (пьезоэлектриках) под действием внешнего электрического поля происходит упорядочение электрических диполей.

Существует несколько способов поляризации пьезоэлектриков:

1. Механическая поляризация – заключается в приложении механического напряжения к материалу.
2. Электрическая поляризация – осуществляется путем приложения электрического поля к материалу.
3. Комбинированная поляризация – включает в себя оба предыдущих способа.

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, и выбор оптимального способа поляризации зависит от конкретных условий применения пьезоэлектрического материала.

Экспериментальное исследование

Для проведения экспериментального исследования была выбрана пара пьезоэлектрик-керамика PZT-5Н. Образцы имели форму диска диаметром 10 мм и толщиной 1 мм.



рис.1 Пьезоэлектрический керамический диск pzt-5h

Исследование проводилось на установке, состоящей из источника питания, генератора сигналов, измерительного оборудования и образцов. Для измерения характеристик поляризации использовались вольтметр, амперметр и осциллограф.

Результаты эксперимента показали, что наиболее эффективным способом поляризации PZT-5H является комбинированный метод, при котором сначала прикладывается механическое напряжение, а затем – электрическое поле. В результате такой поляризации достигается максимальная величина пьезоэлектрического эффекта.

Таким образом, в данной статье были рассмотрены теоретические основы и проведено экспериментальное исследование способов поляризации пьезоэлектрических материалов. Результаты исследования показали, что комбинированный метод поляризации является наиболее эффективным и позволяет достичь максимальной величины пьезоэлектрического эффекта. Эта методика будет использована нами в дальнейшем при создании магнитоэлектрических композитов.

Список публикаций:

[1] Bichurin M., Petrov V. // *Modeling of magnetoelectric effects in composites, Springer series in material science, Volume 201, 2014, 108p.*

Разработка и исследование магнитоэлектрической структуры на основе волокон из аморфного сплава и ЦТС-19

Ивашева Елена Евгеньевна

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

ellen9879@yandex.ru

В последнее время устройства и системы на основе магнитоэлектрического (МЭ) эффекта вызывают огромный интерес в различных областях науки и техники. Большое число публикаций посвящено изучению МЭ эффекта в слоистых структурах, состоящих из магнитоэлектрических и пьезоэлектрических пластин. МЭ структуры находят применение в датчиках магнитных полей [1], харвестерах [2]. Разработка и исследование новых технологий создания МЭ структур позволит добиться улучшения выходных характеристик, следовательно, повысить эффективность различных устройств и систем на их основе.

В данной работе исследуется технология изготовления МЭ структуры – магнитопьезофибера. Он состоит из волокон магнитоэлектрического и пьезоэлектрического (пьезофибер) материалов АМАГ-225 и ЦТС-19, соответственно. Пьезофибер состоит из волокон ЦТС-19 в матрице на основе клея, а также встречно-штыревых электродов и каптонового скотча.

Рассмотрим процесс изготовления пьезофибера: 1) вырезаются 5 тонких волокон размерами 30x2x0.5 мм из пластины ЦТС-19 с помощью дисковой резки; 2) заранее обезжиренные волокна размещаются в подготовленной форме для заливки, при этом расстояние между волокнами составляет 1 мм; 3) пьезоэлектрические волокна (пьезоволокна) заливаются клеем (матрица) и происходит процесс сушки в течение 24 часов; 4) после полного высыхания клея, на подготовленный слой матрицы с пьезоволокнами, с каждой стороны, наносятся встречно-штыревые электроды с зеркальным рисунком; 5) структура покрывается каптоновым скотчем; 6) пьезофибер поляризуется при подаче на встречно-штыревые электроды напряжения 1 кВ в течение 5 минут при комнатной температуре для увеличения пьезоэлектрического модуля d_{33} .

Далее рассмотрим процесс изготовления волокон из магнитострикционного материала АМАГ-225 (магнитофибер): 1) механическим способом нарезаются волокна размерами 30х2 мм из пластины АМАГ-225 толщиной 21 мкм; 2) готовые волокна обезжириваются.

После подготовки пьезофибера и магнитофибера необходимо приклеить с помощью клея волокна АМАГ-225 к каждой стороне пьезофибера и сушить полученный образец магнитопьезофибера в течение 24 часов под прессом.

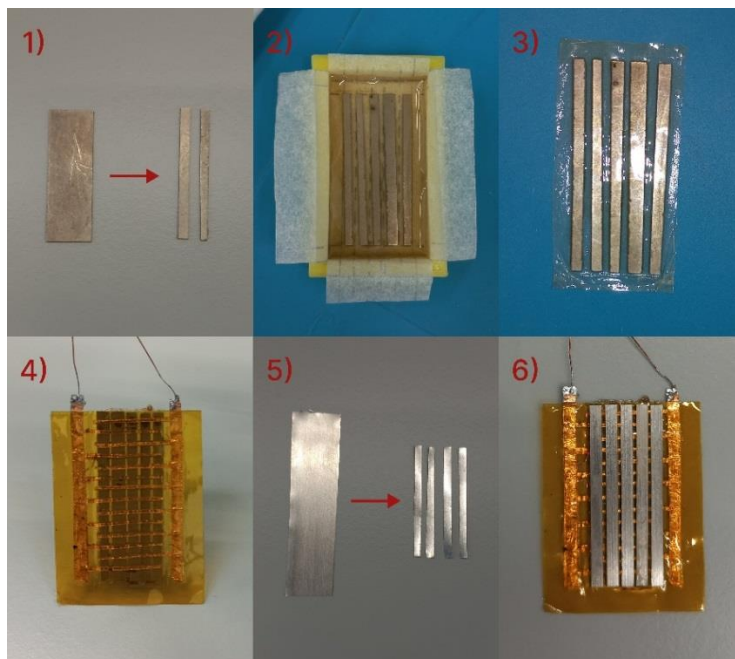


рис.1. Процесс создания магнитопьезофибера: 1) нарезка волокон ЦТС-19; 2) волокна ЦТС-19, залитые клеем в форме для заливки; 3) готовый слой волокон ЦТС-19 в матрице; 4) поляризованный пьезофибер, состоящий из волокон ЦТС, клеевой матрицы, встречно-штыревых электродов и каптона; 5) нарезка пластины метгласа на волокна; 6) готовая структура магнитопьезофибера

На (рис.1) представлен процесс изготовления структуры магнитопьезофибера, где 1) нарезка пластины ЦТС на волокна; 2) волокна ЦТС в клеевой матрице в заранее подготовленной форме для заливки; 3) застывшая матрица с волокнами ЦТС; 4) поляризованный пьезофибер, состоящий из волокон ЦТС, клеевой матрицы, встречно-штыревых электродов и каптона; 5) нарезка пластины метгласа на волокна; 6) готовая структура магнитопьезофибера.

В ходе разработки технологии магнитопьезофибера были сделаны следующие выводы: 1) необходимо учитывать вид встречно-штыревых электродов (ширину штырей, расстояние между ними, их количество) и соблюдать точное совпадение верхнего и нижнего рисунка электродов при нанесении его на слой матрицы с пьезоэлектрическими волокнами; 2) исходя из рисунка встречно-штыревых электродов, расстояний между штырями и толщиной пьезоволокон, необходимо подбирать оптимальное постоянное напряжение для поляризации пьезофибера, чтобы не произошел пробой в структуре; 3) матрица пьезофибера должна обладать высокой диэлектрической проницаемостью.

Разработка технологии и исследование магнитопьезофибера является перспективным направлением в области создания новых видов МЭ структур для высокочувствительных сенсоров и измерительных систем, поскольку в МЭ структурах, где используется волокнистый материал, наблюдаются высокие значения МЭ эффекта [3]. Дальнейшая работа будет посвящена улучшению и доработке технологии создания пьезофибера и магнитопьезофибера, подробному экспериментальному и теоретическому исследованию данной МЭ структуры и развитию теоретических моделей и методов расчета для оптимизации характеристик магнитопьезофибера для его практического применения.

Список публикаций:

- [1] Bichurin M., Petrov R., Sokolov O., Leontiev V., Kuts V., Kiselev D., Wang Y. *Magnetolectric Magnetic Field Sensors: A Review // Sensors.* – 2021, 21. 6232.
- [2] Wu H., Tatarenko A., Bichurin M., Wang Y. *A multiferroic module for biomechanical energy harvesting // Nano Energy.* – 2021, 83. 105777.
- [3] Dong S., Zhai J., Li J., Viehland D., *Near-ideal magnetoelectricity in high-permeability magnetostrictive/piezofiber laminates with a (2-1) connectivity // Applied Physics Letters.* – 2006, 89. 252904.

Структура и свойства $k\pi$ -скирмионов в неоднородных ферромагнитных пленках

Ильцова Галия Флюсовна

Вахитов Роберт Миннисламович, Солонецкий Ростислав Владимирович

Уфимский университет науки и технологий

Вахитов Роберт Миннисламович, д.ф.-м.н.

galiya.siraeva2014@yandex.ru

В последнее время наблюдается устойчивый интерес к изучению магнитных скирмионов: их возможных типов, свойств и магнитных материалов, в которых они стабилизируются. Он обусловлен их необычными спин-электронными свойствами [1], а также перспективами их применений в устройствах спинтроники и искусственных нейронных сетях. [2]. Впервые магнитные скирмионы были обнаружены в киральных магнетиках [3], в которых благодаря наличию взаимодействия Дзялошинского-Мория они образуют устойчивые состояния. Однако в таких магнетиках, в силу разных причин, возникли определенные трудности с устойчивостью магнитных скирмионов [4,5], в результате чего появился спрос на альтернативные методы их стабилизации в других материалах, в которых отсутствует взаимодействие Дзялошинского-Мория. Одним из возможных способов реализации такого подхода был предложен в работах [6], в которых было показано, что такими материалами могут являться ферромагнитные пленки с пространственно модулированной одноосной анизотропией. В дальнейшем было установлено, что магнитные скирмионы могут существовать в таких материалах в широком диапазоне изменения температур и магнитных полей. В большинстве последующих исследований под магнитными скирмионами, как правило, понимались вихреподобные неоднородности, в которых единичный вектор намагниченности $\mathbf{m}=\mathbf{m}(r)$ поворачивается на 180° при его перемещении в радиальном направлении от центра ($r = 0$) до периферии ($r = R$) пленки (π -скирмионы). В то же время, появились исследования в которых предсказывалась возможность существования $k\pi$ -скирмионов ($k \in 1, 2, 3...$) [7].

В данной работе изучаются устойчивые состояния магнитных $k\pi$ -скирмионов, образующихся на колумнарных дефектах типа «потенциальная яма» в одноосных ферромагнитных пленках [8]. Подобные исследования в некиральных магнетиках до недавнего времени практически не проводились, за исключением работы [9], в которых исследовалось влияние магнитного поля на $k\pi$ -скирмионы, ($k \in 2,3,4$), возникающие в магнитных нанодисках Fe_3Sn_2 . В частности, были обнаружены устойчивые состояния $2\pi, 3\pi$ и 4π -скирмионов в исследуемых пленках. При этом была обнаружена следующая закономерность в появлении $k\pi$ -скирмионов: чем больше размер диска, тем вероятнее обнаружить скирмион в них с большей величиной «закрутки» вектора намагниченности, т.е. величиной k . В качестве модели дефекта рассматривается структурная неоднородность магнетика, в которой материальные параметры $P = \{A, K_u, M_s\}$, изменяются скачком в области дефекта:

$$P = \begin{cases} P_1, r > R_0 \\ P_2, r \leq R_0 \end{cases}, \quad (1)$$

где $P_i = \{A_i, K_{u_i}, M_{s_i}\}$ — материальные параметры вне колумнарного дефекта ($i = 1$) и в области дефекта ($i = 2$). Здесь A — обменный параметр, K_u — константа одноосной анизотропии, M_s — намагниченность насыщения, R_0 — радиус дефекта. При этом необходимо отметить, что все параметры, имеющие размерность длины приведены к величине $\Delta_0 = \sqrt{A_1/K_{u1}}$, где Δ_0 — характерный размер доменной границы в одноосных ферромагнетиках.

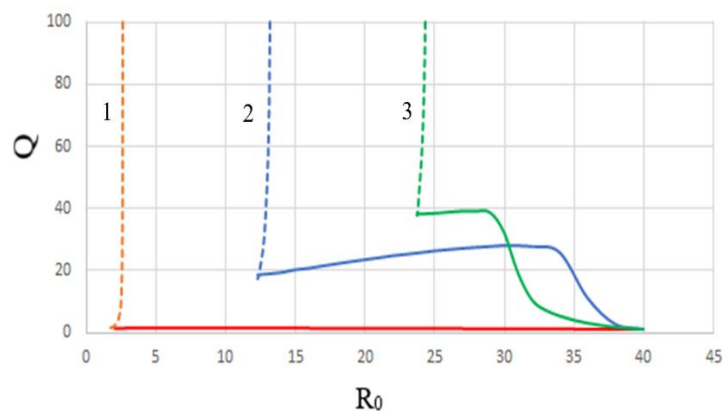


рис. 1. Диаграмма области устойчивости для 1- π -скирмиона (красная линия), 2 - 3π -скирмиона (синяя линия), 3 - 5π -скирмиона (зеленая линия) при следующих значениях материальных параметров $K_{u2} = -2K_{u1}$, $A_2 = A_1$, $M_{s2} = M_{s1}$.

Из приведенных расчетов структуры и устойчивости $k\pi$ -скирмионов следует, что они могут существовать как устойчивые образования в магнитоодноосных пленках на колумнарных дефектах типа

потенциальная яма. Топология и размеры этих неоднородностей существенно зависят от характеристик дефекта (A_2 , K_{u2} , M_{s2} , R_0) и прежде всего от его радиуса R_0 и глубины потенциальной ямы K_{u2} . Можно отметить, что начальный профиль распределения намагниченности ($R_0 < 0$) для всех трех типов $k\pi$ -скирмионов ($k \in 1,3,5$) совпадает вне зависимости от величины R_0 . Исследования показывают, что энергетически более выгоден π -скирмион, а $3\pi, 5\pi$ - скирмионы существуют как метастабильные состояния. Кроме того, построены диаграммы устойчивых состояний $k\pi$ -скирмионов (рис 1.), при этом нижний порог устойчивости π -скирмионов относительно размеров дефекта начинается с малых R_0 ($R_0 \geq 1$), 3π -скирмионов- с больших R_0 ($R_0 \geq 14$), а 5π -скирмионов- с $R_0 \geq 25$

Список публикаций:

- [1] A. Neubauer, C. Pfleiderer, B. Binz, A. Rosch, R. Ritz, P.G. Niklowitz, P. Boni, // *Phys. Rev. Lett.* 2009. 102.186602.
- [2] M. Kläui, K. Everschor-Sitte, O. Lee, R. Msiska // *Appl. Phys. Lett.* 2023. 122. 260501.
- [3] A. Bogdanov, A.; Hubert // *J. Magn. Magn. Mater.* 1994. 138. P. 255–269.
- [4] F. Jonietz, S. Mühlbauer, C. Pfleiderer, et al. // *Science.* 2010. 330. P.1648–1651.
- [5] F. Büttner, C. Moutafis, M. Schneider, et al. // *Nat. Phys.* 2015. 11. P. 225–228.
- [6] P.M.Вахитов, Т.Б.Шанаева, Р.В.Солонецкий, А.Р.Юмагузин // *ФММ.*2017.118.571
- [7] J. Hagemester, A. Siemens, L. Rózsa, E. Y. Vedmedenko, and R. Wiesendanger // *Phys. Rev.*2018. B 97, 174436
- [8] R. M. Vakhitov, R.V. Solonetsky, A. A. Akhmetova // *J. Appl. Phys.* 2020. 128. 000000.
- [9] J. Jiang, Y. Wu, L. Kong, Y. Wang, J. Li, Y. Xiong, J. Tang // *Acta Materialia.* 2021. 215. 117084.

Комплексное исследование свойств замещенной никелевой шпинели, полученной по короткой технологической схеме

Карева Катерина Валерьевна^{1,2}

Сураев Александр Сергеевич¹, Труфанова Наталья Сергеевна²

¹Томский государственный университет

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Вагнер Дмитрий Викторович, к.т.н.

katkareva1@gmail.com

Магнитомягкие ферриты являются востребованными материалами для производства пассивных электронных компонентов, таких как планарные катушки индуктивности, фазовращатели, вентили, циркуляторы и др. Особенно активно используются ферритмагнетики со структурой шпинели из-за высокой температуры Кюри и наличия резонансов доменной структуры и естественного ферромагнитного резонанса в диапазоне высоких частот. От синтеза ферритов зависят их магнитные и структурные свойства, которыми определяется область практического применения материалов. В число распространенных методов синтеза входят керамическая технология [1], золь-гель горение [2], самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) [3], метод химического соосаждения [4]. В серийном производстве наиболее часто используется именно многостадийная керамическая технология.

В данной работе проводились комплексные исследования ферритов-шпинелей $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ ($x = 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$), изготовленных по короткой технологической схеме, предложенной в работе [5]. Структурные параметры и фазовый состав определяли при помощи автоматизированного дифрактометра ДРОН 2 УМ на фильтрованном кобальтовом излучении (CoK α). Исследование температуры Кюри проводили по методике, подробно описанной в работе [6]. Измерение петель магнитного гистерезиса проводили на импульсном магнитометре в полях до 6,5 кЭ при температуре 300 К. Принцип работы импульсного магнитометра и методика измерения представлены в работе [7]. Поля анизотропии определялись методом обнаружения сингулярных точек [8]. Размер частиц был оценен с помощью сканирующей электронной микроскопии на электронном микроскопе Сохет EM-30Plus.

Рентгенофазовый анализ подтвердил однофазность всех полученных образцов. Величины областей когерентного рассеяния (ОКР) значительно не изменяются с увеличением содержания ионов цинка (ОКР ≈ 129 нм). Размер кристаллитов выше, чем при синтезе ферритов аналогичного состава, полученного методами золь-гель горения [9] и химического соосаждения [10]. На рисунке 1(а) приведен снимок частиц для феррита $x = 0,3$. Размер частиц для всех образцов ферритов не превышал 10 мкм.

Зависимости удельной намагниченности насыщения (σ_s) и коэрцитивной силы (H_c) от концентрации ионов цинка приведены на рис. 1(б). Значения σ_s увеличиваются с 56 до 87 Гс·см³/Г при $x = 0,0$ и $x = 0,4$, соответственно. Значения H_c уменьшаются последовательно с 33 до 10 Э при увеличении концентрации ионов цинка x в составе ферритов. Изменение данных характеристик связаны с перераспределением ионов в тетраэдрической и октаэдрической подрешетках, что влияет на величины магнитных моментов в решетке.

Однако значения полей анизотропии H_a не претерпевают изменений при замещении ионов никеля ионами цинка (1230 Э). Значения температуры Кюри уменьшаются с 585 до 389 °С при замещении ионов никеля ионами цинка.

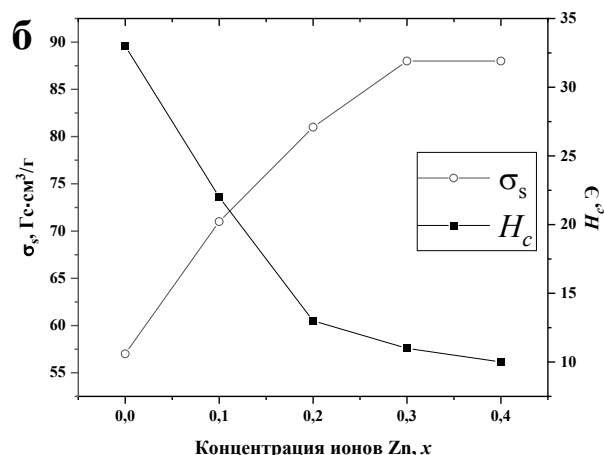
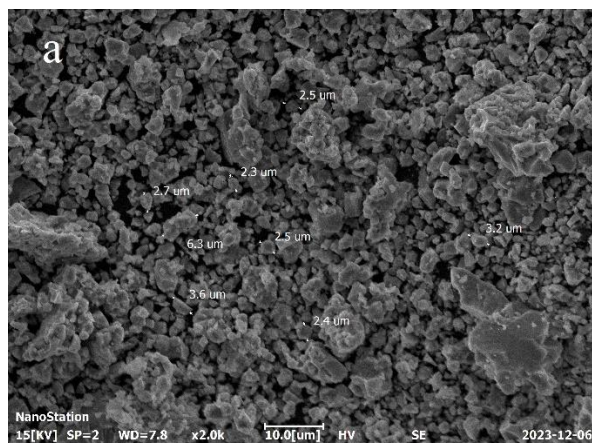


рис.1 (а) Изображение сканирующей электронной микроскопии образца
(б) Зависимость магнитных характеристик от концентрации ионов цинка

Полученные значения магнитных и структурных характеристик хорошо согласуются с уже опубликованными данными, где проводился синтез ферритов другими методами, такими как химическое соосаждение [9] и СВС [10]. Вследствие чего можно сделать вывод о целесообразности применения короткой технологической схемы для изготовления шпинельных ферритов. Проведенные исследования могут помочь в выборе состава феррита для практического применения с учетом рабочего температурного диапазона и магнитных характеристик.

Авторы выражают благодарность доценту кафедры радиоэлектроники радиофизического факультета Журавлеву Виктору Алексеевичу за проведение исследований температуры Кюри. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, номер гранта 23-29-00400, <https://rscf.ru/project/23-29-00400/> (дата обращения: 4 марта 2024 г.).

Список публикаций:

- [1] Lu X. et al. // *Micromachines*. 2024. Vol. 15(2). P. 215.
- [2] Dippong et al. // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13(24). P. 3096.
- [3] Журавлев В.А. и др. // *Изв. вузов. Физика*. 2012. Т. 55. № 8/2. С. 181-182.
- [4] Islam K. et al. // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10. P. 2297.
- [5] Канева И.И. // *Изв. вузов. Мат. Электрон. Техн.* 2014. Т. 66. № 2. С. 99–103.
- [6] Lysenko E.N. et al. // *Ceram. Int*. 2019. Vol. 45. P. 20148–20154.
- [7] Wagner D.V. // *Inventions*. 2023. Vol. 8. Iss. 1. P. 00026.
- [8] Asti G. et al. // *Phys. Rev. Lett*. 1972. Vol. 28. Iss. 24. P. 1584–1586.
- [9] Khan S.B. et al. // *Nanomaterials*. 2019. Vol. 9(7). P. 1024.
- [10] Houshiar M. et al. // *Mater. Res. Bull*. 2018. V. 98. P. 213–218.

Перестраиваемый полосно-пропускающий СВЧ фильтр на магнитоэлектрических резонаторах

Кафаров Руслан Гайдарович

Бельшев Андрей Александрович

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Лобекин Вячеслав Николаевич

evraudx14@gmail.com

Одним из перспективных направлений развития СВЧ-техники в настоящее время является разработка устройств на основе микроволнового магнитоэлектрического эффекта (МЭ). В таких устройствах реализуется перестройка параметров с помощью сдвига линии ферромагнитного резонанса (ФМР) под действием управляющего электрического поля. В качестве МЭ резонаторов используются феррит-сегнетоэлектрические структуры, например, из железо-иттриевого граната (ЖИГ) и цирконата-титаната свинца (ЦТС) (рис. 1),

помещаемые на микрополосковые линии (МПЛ), в связи с этим возникают ограничения в конструкции, которые необходимо учитывать при создании устройств такого типа [1].

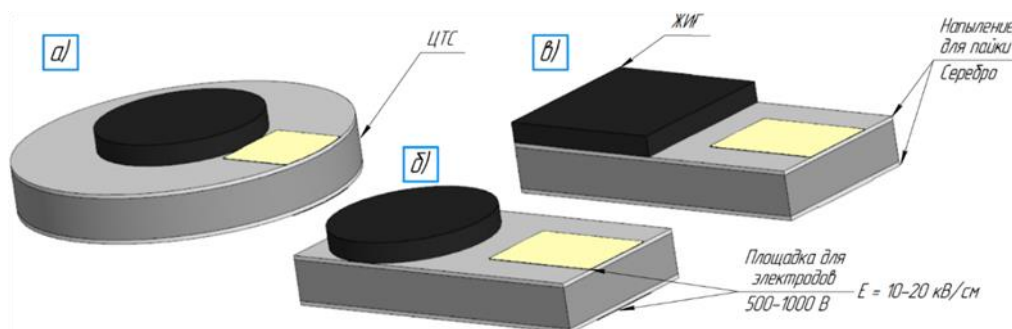


рис. 1. Варианты исполнения МЭ композитов ЖИГ-ЦТС: а) диск-диск, $D_{m,p} = 2; 4$ мм; б) диск-квадрат, $D_m = 2$ мм, $A_p \times B_p = 2 \times 4$ мм; в) квадрат-квадрат, $A_m \times B_m = 2 \times 2$ мм, $A_p \times B_p = 2 \times 4$ мм.

При проектировании полосно-пропускающих фильтров (ППФ) сначала определяется число резонаторов. Однорезонаторные фильтры обладают низкими избирательностью и прямоугольностью амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), но просты в изготовлении. Очевидно, что увеличение числа МЭ резонаторов повышает вносимые потери и усложняет конструкцию, поэтому компромиссным вариантом, обеспечивающим приемлемые параметры, является двухрезонаторный ППФ на МПЛ. Быстрым и точным способом проектирования ППФ является компьютерное моделирование при помощи программ Ansys HFSS и AWR Microwave Office.

Следующим этапом является выбор типа ППФ. Синтезируем двухрезонаторный ППФ с центральной частотой (ЦЧ) 6 ГГц, шириной полосы пропускания (ПП) 100 МГц и волновым сопротивлением 50 Ом с учётом миниатюризации и минимальных вносимых потерь. Фильтр должен быть реализован на связанных МПЛ, чтобы осуществить частотную перестройку при помощи МЭ резонаторов, поэтому подойдут ППФ, например, на связанных линиях с краевой/концевой связью или шпилечного типа. Тип ППФ выбирается в зависимости от требований к АЧХ. Важно понимать, что величина зазоров МПЛ определяет вносимые потери, при этом зазоры должны быть достаточными для размещения в них МЭ резонаторов. К тому же, во избежание электрического пробоя, МЭ резонаторы должны быть достаточно удалены друг от друга. Для получения ранее заданной АЧХ фильтры с краевой/концевой связью подходят слабо из-за больших размеров и потерь, низких прямоугольности АЧХ и избирательности, поэтому выберем фильтр шпилечного типа (рис. 2).

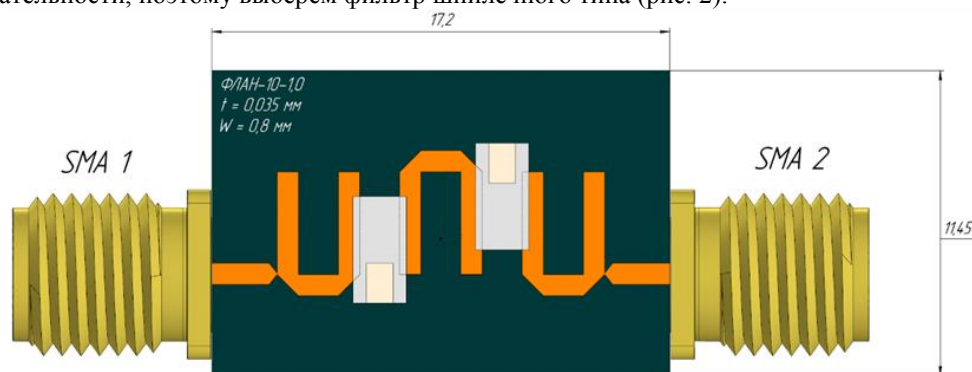


рис. 2. Спроектированный в AWR Microwave Office МЭ ППФ шпилечного типа.

Диэлектрическая подложка выбирается с высоким значением ϵ , например, ФЛАН-10-1,0 или аналоги Rogers. В остальном синтез МЭ ППФ не отличается от синтеза обычного ППФ. Было проведено электромагнитное моделирование для получения S-параметров фильтра (рис. 3).

Ширина ПП составила 97,5 МГц, ослабление на ЦЧ 5,98 ГГц равно -2,8 дБ. Коэффициент отражения S11 на ЦЧ -13 дБ. Волновое сопротивление 49,9 Ом. Ближайшая высшая гармоника возникает на частоте 10,4 ГГц, ослабление -2,5 дБ, ширина гармоники по уровню -3 дБ составила 1 ГГц. В дальнейшем планируется проведение эксперимента с разработанным МЭ ППФ для определения оптимальной геометрии МЭ резонаторов и использования его в приёмно-передающем модуле [2].

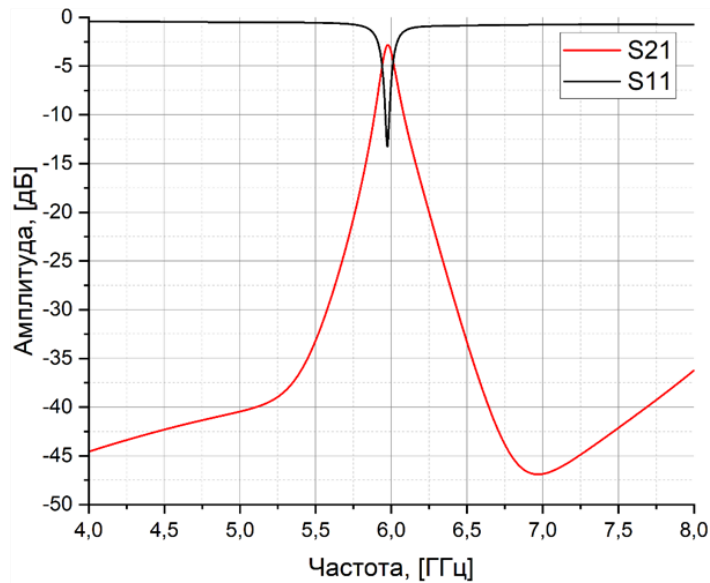


рис. 3. S-параметры ППФ без МЭ резонаторов, полученные в Ansys HFSS.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 24-15-20044.

Список публикаций:

[1] Лобекин В.Н., Кафаров Р.Г., Татаренко А.С., Муравьев В.Е. Исследование связи резонаторов микроволнового магнитоэлектрического полосового фильтра с помощью компьютерного моделирования // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2022. №3(128). С.96-101.

[2] Бичурин М.И., Петров Р.В., Татаренко А.С. Магнитоэлектрические устройства для ФАР // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 4.

Магнитоэлектрический датчик магнитного поля на основе магнитострикционно-пьезоэлектрической структуры

Козонов Александр Юрьевич

Сыроварова Кристина Андреевна, Семенова Ксения Витальевна

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

s241716@std.novsu.ru

Любые датчики, и в том числе датчики магнитного поля стремятся к высокой чувствительности для последующего более широкого их применения. Одной из областей, нуждающихся в высокочувствительных датчиках магнитного поля, является медицина. Это связано с тем, что многие живые организмы генерируют довольно слабые магнитные поля порядка 10 пТл.

Известный магнитоэлектрический (МЭ) эффект, наблюдаемый в магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах и заключающийся в возникновении электрической поляризации во внешнем магнитном поле и в намагничивании во внешнем электрическом поле мог бы решить проблему повышения чувствительности датчиков магнитного поля. Подобные устройства на основе МЭ композитов показывали более высокую чувствительность к магнитному полю, чем их аналоги на основе других материалов.

Например, широкополосный низкочастотный датчик магнитного поля, состоящий из стопы склеенных между собой многослойных пьезоэлектрических элементов и магнитострикционных (Ni) пластин с отрицательной магнитострикцией с практически неизменной чувствительностью датчика в 20 В/Тл в широком диапазоне частот обеспечивает нижний порог измерения магнитного поля $5 \cdot 10^{-8}$ Тл [2].

Также из [1] известно об опытах с датчиками тороидальной структуры, которые отличились повышенной чувствительностью к магнитному полю. В данном эксперименте в качестве магнитострикционной фазы использовался Метглас, а в качестве пьезоэлектрической – пластины цирконат-титаната свинца (ЦТС). Эти же материалы использовались автором тезиса в собственных экспериментах. Так, на рисунке 1 изображён график зависимости МЭ напряжения на электродах датчика с тороидальной структурой Метглас-ЦТС-Метглас от частоты поля. Максимальное выходное напряжение составило порядка 133 мВ на частоте 195 кГц.

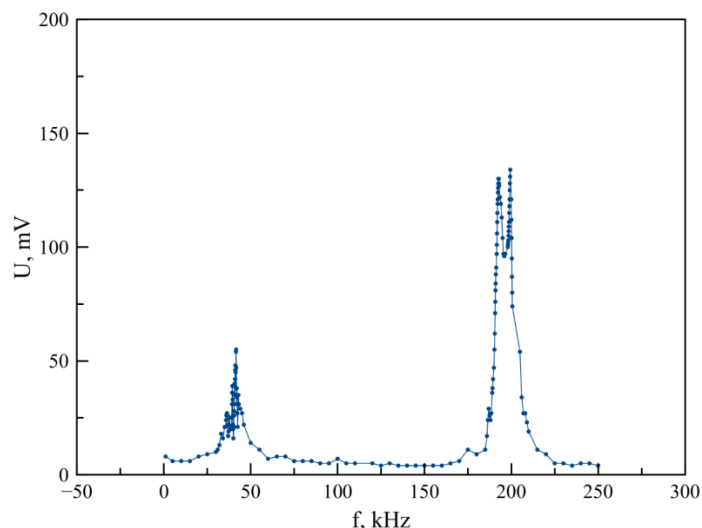


рис. 1.: график зависимости МЭ напряжения от частоты

Автором тезиса и коллегами также была разработана полезная модель МЭ датчика с несимметричной структурой. Повышение чувствительности датчика достигалось за счёт того, что структура находилась в режиме магнитоакустического резонанса, объединяющего крутильную моду и ферромагнитный резонанс. [3]

Также предлагается проводить эксперименты с датчиками, структура которых изображена на рисунке 2. Повышение объёмной доли магнитострикционной компоненты в данном случае может поспособствовать усилению резонансного сигнала и снижению резонансной частоты. Согласно выполненным расчётам датчик с пьезоэлектрической фазой в виде материала PMN-PT должен показать более высокую чувствительность, чем датчик с той же фазой в виде ЦТС.

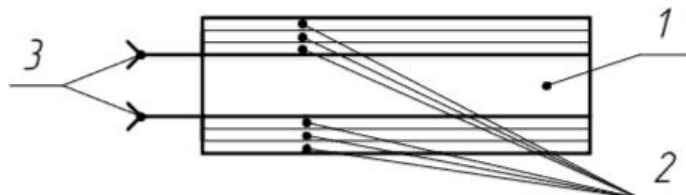


рис. 2: структура датчика магнитного поля: 1 – пластина ЦТС или РМN-РТ; 2 – ленты Метгласа; 3 – электроды.

Эксперименты с МЭ структурами для создания новых датчиков магнитных полей представляют большой практический интерес. Поиск новых материалов и способов повышения чувствительности датчиков к магнитному полю приведёт к усовершенствованию современного оборудования, в том числе и медицинского, рассчитанного на слабые поля.

Список публикаций:

[1] *Magnetolectric Vortex Magnetic Field Sensors Based on the Metglas/PZT Laminates* / Do Thi Huong Giang [et al.]. *Sensors* 2020, 20, 2810; doi:10.3390/s20102810

[2] Пат. 118071 Российская Федерация, МПК G01R 33/02. Широкополосный низкочастотный датчик магнитного поля / Фетисов Ю. К., Чашин Д. В., Итальянцев А. Г., Шульга Ю. В.; патентообладатели: Общество с ограниченной ответственностью Научно-технологический Центр "АГИТАЛ", Закрытое акционерное общество "НПЦ СпецЭлектронСистемы". – № 2012113943/28; заявл. 11.04.2012; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19.

[3] Пат. 216369 Российская Федерация, МПК G01R 33/02. Магнитоэлектрический датчик магнитного поля / Лобекин В. Н., Бичурин М. И., Козонов А. Ю., Кафаров Р. Г.; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого». - № 2022130534; заявл. 24.11.2022; опубл. 31.01.2023, Бюл. № 4.

Магнитные свойства многослойных наноструктур на основе Co и Ni

Косырев Леонид Николаевич

МАОУ СШ № 72 М. Н. Толстихина, г. Красноярск

Косырев Николай Николаевич, к.ф.-м.н.

leonidkosyrev752@gmail.com

В связи с бурным развитием нанотехнологий в последние годы актуальна проблема контроля физических свойств получаемых наноматериалов. Так, тонкопленочные гетероструктуры с чередованием полупроводниковых и магнитных слоев представляют огромный интерес для спинтроники. На современном этапе развития нанотехнологий и материаловедения стоит задача создания совершенных по структуре полупроводниковых и магнитных материалов, что обусловлено высокой чувствительностью электронных свойств материала к дефектам и неоднородностям структуры. Это связано с тенденциями развития твердотельной микроэлектроники, направленными на повышение степени интеграции и переходом к использованию квантово-размерных явлений и двумерных кристаллов.

Структуры с чередованием различных магнитных материалов интересны своими необычными свойствами, например наличием перпендикулярной магнитной анизотропии. Перпендикулярная магнитная анизотропия (англ. perpendicular magnetic anisotropy, PMA) - это явление, характеризующееся предпочтительной ориентацией намагниченности в пленках в направлении, перпендикулярном плоскости пленки. Она играет важную роль в различных магнитных устройствах, таких как магнитно-туннельные структуры (magnetic tunnel junctions) и устройства памяти. Однако, создание стабильной перпендикулярной анизотропии в тонких пленках может быть вызовом из-за физических и химических свойств материалов и процессов при их изготовлении. Поэтому исследование и разработка новых материалов и методов для достижения эффективной перпендикулярной магнитной анизотропии остаются активной областью исследований в современной нанотехнологии и магнетизме.

В данной работе методом магнитооптического эффекта Керра исследованы двухслойные системы Ni/Co с различными толщинами слоев (рисунок 1)

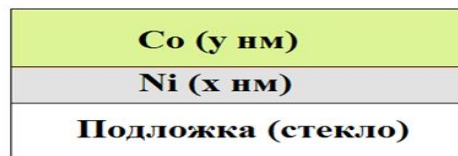


рис.1. Схема исследуемых образцов. Толщины слоев Ni X=2-20 нм
Co Y=3-13 нм

На рисунке 2 представлены петли гистерезиса, снятые при различных температурах. По оси ординат отложен сигнал магнитооптического эффекта Керра, который пропорционален намагниченности той части образца, которую захватывает зондирующий пучок. Учитывая диаметр светового пятна 50 мкм, а также глубину проникновения примерно 50 Нм (на данной длине волны), можно оценить объем материала, намагниченность которого мы измеряем. В данном случае он составляет $\approx 9,8 \cdot 10^{-17} \text{ м}^3$

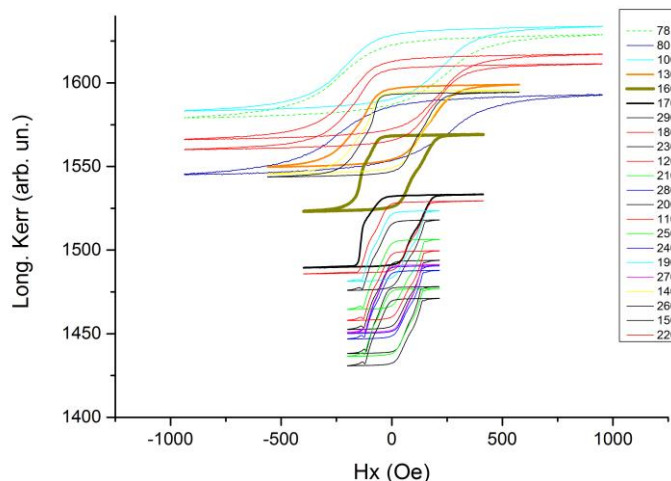


рис.2. Петли гистерезиса в структуре Ni20/Co13

Анализируя получившуюся систему графиков, можно отметить, что чем больше температура, тем петля гистерезиса ниже на графике и в целом, поведение намагниченности согласуется с данными для пленок Co [1]. Но при этом критической точкой является 160К, при которой происходит резкий скачок на следующую петлю, а из этого следует что в данном эксперименте эффект Керра, а значит и намагниченность исследуемого образца, не всегда пропорциональна температуре. Похожий эффект наблюдался в работе [2], где измеряли намагниченность двухслойных систем Co/CoO. Это означает, что у нас на поверхности Co образовался слой оксида кобальта, который и влияет на магнитные свойства.

Список публикаций:

[1] Кобяков А.В., Турпанов И.А., Патрин Г.С., Руденко Р.Ю. Структурные и магнитные свойства систем $Al_2O_3/Ge-p/Al_2O_3/Co$ // Журнал технической физики. 2019. Том 89, № 2. С. 268-273

[2] F. Radu, M. Etkorn, R. Siebrecht et al. Interfacial domain formation during magnetization reversal in exchange-biased CoO/Co bilayers // PHYSICAL REVIEW B 67, 134409 (2003)

Исследование магнитоэлектрических градиентных структур PZT/Metglas/Ni

Марков Иван Юрьевич

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

ivanmarckov02@mail.ru

Известно, что использование градиентных магнитоэлектрических (МЭ) структур позволяет исключить необходимость в использовании дополнительных элементов, таких как постоянные магниты, обеспечивающих подмагничивание магнитоэлектрического материала, в разрабатываемых устройствах на основе МЭ композитов, что приводит к существенному снижению веса, габаритов и энергопотребления [1].

В градиентных МЭ структурах внутреннее магнитное поле смещения на практике создается разделением магнитоэлектрической фазы на две области с различными значениями намагниченности насыщения для создания градиента намагниченности [2].

В данном сообщении мы исследовали МЭ структуру PZT/Metglas/Ni с целью создания внутреннего магнитного поля, обеспечивающего максимальный МЭ эффект, путем подбора необходимой толщины никелевого компонента. В нашем эксперименте были использованы 4 прямоугольных образца с градиентной структурой (рис.1) на основе пьезоэлектрической пластины PZT (ЦТС-19), магнитоэлектрических слоев материала Metglas (аморфный магнитомягкий сплав АМАГ225, ПАО «Мстатор», Россия) толщиной 21 мкм и никелевой фольги толщиной 8 мкм, соединенных клеем БФ-2. Толщина PZT $t_p = 0,5$ мм, толщина Metglas $t_{m2} = 63$ мкм (3 слоя). Суммарная толщина никеля t_{m1} для разных образцов составляла 16, 24, 40 и 56 мкм (2, 3, 5 и 7 слоев соответственно). Длина и ширина МЭ композитов 30x10 мм.

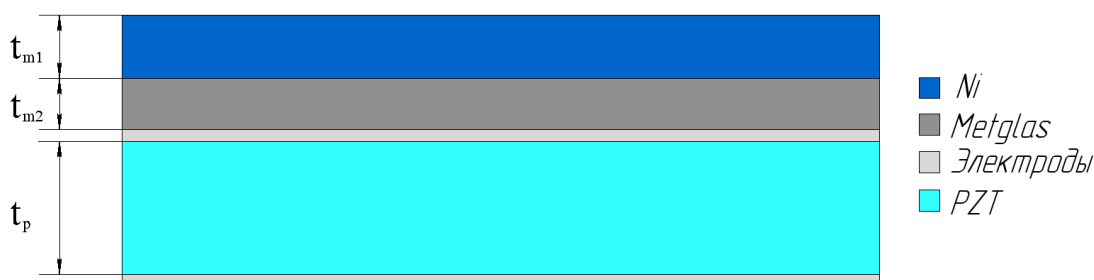


рис.1. Несимметричная градиентная структура PZT/Metglas/Ni

На (рис.2) представлена экспериментальная зависимость МЭ коэффициента по напряжению от частоты направленного вдоль длины переменного магнитного поля амплитудой 1 Э для образцов с различной толщиной никеля при отсутствии внешнего подмагничивающего поля.

Из полученных графиков видно, что максимальный МЭ эффект наблюдается при толщине никеля 16 мкм и составляет 2,56 В/(см·Э) на частоте 52,7 кГц. Полученный максимум МЭ эффекта при 16 мкм никеля соответствует такой же величине МЭ эффекта, измеренной при внешнем подмагничивающем поле 10 Э в структуре PZT/Metglas без никеля. При дальнейшем увеличении толщины никеля МЭ коэффициент по напряжению уменьшается, а резонансная частота смещается вправо.

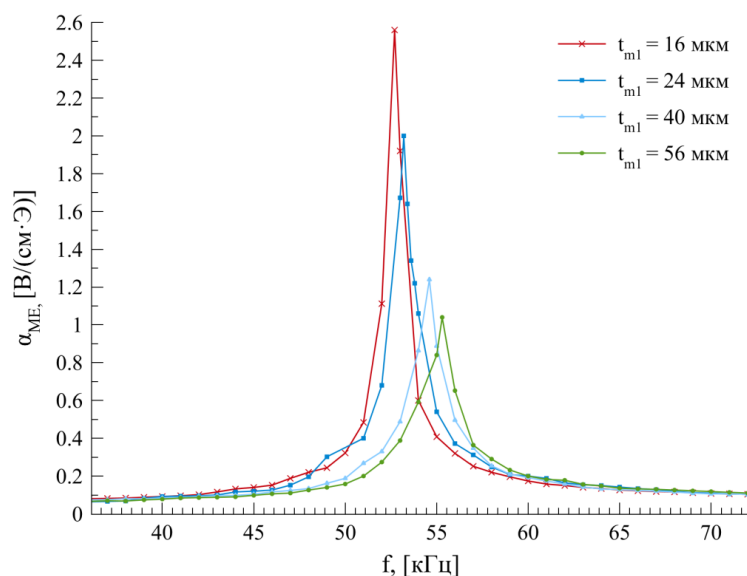


рис.2. Зависимость МЭ коэффициента по напряжению от частоты переменного магнитного поля для образцов с различной толщиной слоя никеля при отсутствии внешнего магнитного поля

Из-за потерь, вызванных большим количеством диэлектрических прослоек клея БФ-2 между фазами, МЭ эффект значительно уменьшается. Поэтому для оптимизации МЭ эффекта в композитах, сделанных по клеевой технологии, необходимо использовать токопроводящий клей, чтобы снизить потери.

В настоящий момент нами ведётся разработка токопроводящего клея на основе порошков никеля и Metglas для создания межфазных соединений. Преимуществом использования такого клея для создания МЭ композитов будет отсутствие диэлектрических прослоек между различными фазами и, как следствие, увеличение МЭ коэффициента по напряжению. Планируется оптимизация исследованных градиентных структур с использованием нового токопроводящего клея.

Список публикаций:

- [1] Bichurin M., Petrov R., Leontiev V., Sokolov O., Turutin A., Kuts V., Kubasov I., Kislyuk A., Temirov A., Malinkovich M., Parkhomenko Y. Self-Biased Bidomain LiNbO₃/Ni/Metglas Magnetolectric Current Sensor. *Sensors*. 2020. 20(24). 7142.
 [2] Mandal S., Sreenivasulu G., Petrov V., Srinivasan G. Magnetization-graded multiferroic composite and magnetoelectric effects at zero bias. *Phys Rev B Condens Matter Mater Phys*. 84 (2011).

Наночастицы семейства ферритов $\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$: магнитные свойства и применение

Сердюк Анастасия Андреевна

Светлицкий Евгений Сергеевич

Сибирский федеральный университет

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН

Ирина Самсоновна Эдельман

onyoursde4@gmail.com

За последние десятилетия интенсивно развивались методы синтеза наноразмерных материалов, что значительно расширило возможности получения наноферритов различных контролируемых составов. Возможность замещать одни катионы другими в широком диапазоне концентраций позволяет радикально изменять свойства ферритов со структурой шпинели. Семейство замещенных ферритов с общей формулой $\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ представляет собой яркий пример изменений свойств от магнито-жесткого до магнито-мягкого материала при изменении x . Крайние члены этого ряда CoFe_2O_4 ($x=0$) и MgFe_2O_4 ($x=1$) являются обращенными шпинелями. Целью настоящей работы является изучение влияния состава феррита, изменяющегося при постепенном замещении магнитного иона кобальта немагнитным ионам магния, на магнитные свойства образцов $\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$), определение величины магнитной анизотропии и установление закономерностей, связывающих температурные и концентрационные зависимости коэрцитивной силы со степенью замещения кобальта магнием. В работе также проведено исследование возможности использования данного семейства неперо-ферритов в качестве адсорбентов органических красителей. Тема очистки водных ресурсов от растворенных в ней загрязняющих компонентов, является актуальной и востребованной в современном индустриальном мире.

Зависимости намагниченности образцов от внешнего магнитного поля показывают переход от магнито-жесткого к магнито-мягкому материалу по мере увеличения значения x : остаточная намагниченность (M_s) и коэрцитивная сила (H_c) уменьшаются по мере замещения ионов Co ионами Mg. При понижении температуры M_s , коэрцитивная сила H_c и степень прямоугольности петель гистерезиса всех образцов возрастают в несколько раз. При этом характер изменения H_c одинаков для всех образцов, кроме образца с $x=1.0$, для которого увеличение H_c незначительно и линейно по температуре. Сильное возрастание H_c приводит к тому, что в использованных полях при понижении температуры остаются только частные циклы, как показано на рис. 1 а для образца с $x = 0.6$, и в образцах с $x = 0.0, 0.2, 0.4$ и 0.6 магнитное насыщение в максимальном магнитном поле 15 кЭ при понижении температуры не достигается. Это обуславливает кажущееся уменьшение намагниченности при понижении температуры (рис. 1б, кривые 2 и 3). Таким образом, экспериментальное определение M_s при низких температурах в используемых магнитных полях становится невозможным для образцов 1-4, и для оценки величины M_s при 0 К (M_{s0}) был использован закон Блоха:

$$M_s = M_{s0} \cdot (1 - B \cdot T^{3/2}) \quad (1)$$

где B – параметр материала. Значение M_{s0} для всех образцов было получено экстраполяцией к 0 К участка экспериментальной кривой $M_s(T)$, который удовлетворяет закону Блоха, как это показано на рис. 1б. Для расчёта константы анизотропии при конечной температуре был использован закон приближения намагниченности к насыщению

$$M(H) = M_s \left(1 - \frac{4}{15} \left(\frac{K_{eff}}{M_s H} \right)^2 \right) \quad (2)$$

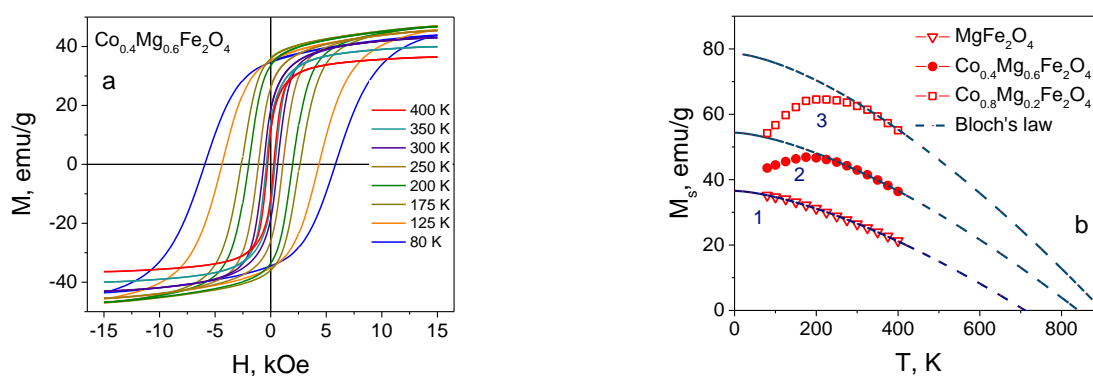


рис 1. а - Полевые зависимости намагниченности при различных температурах для образца с $x=0.6$; б - зависимости $M_s(T)$ для образцов $MgFe_2O_4$, $Co_{0.4}Mg_{0.6}Fe_2O_4$ и $Co_{0.8}Mg_{0.2}Fe_2O_4$ (кривые 1, 2, 3), точки - эксперимент, штриховые линии - закон Блоха, сплошные – экстраполяция кривых к 0 К по закону Блоха.

Рассчитанные таким образом значения константы эффективной анизотропии K_{eff} при 0 К зависят от x аналогично зависимости H_c от x . K_{eff} образцов 1-5 монотонно уменьшается от $5.27 \cdot 10^6$ до $1.29 \cdot 10^6$ эрг/см³, несколько быстрее, чем по линейному закону, но даже для наименьшей использованной концентрации кобальта ($1 - x = 0.2$) оставалось очень большим, практически, на 2 порядка величины превышая K_{eff} ($4 \cdot 10^4$ эрг/см³) образца, не содержащего кобальта. Таким образом, магнитные свойства синтезированных наночастиц определяются ионами Co^{2+} до самой низкой использованной концентрации ($1 - x = 0.2$).

Исследование адсорбционных свойства были проведены на двух модельных органических красителях: катионного (Метилен синий (МВ)) и анионного (Конго красный (СР)) типов. Адсорбционная емкость рассчитывалась по изменению интенсивности максимумов в спектрах оптического поглощения растворов красителей до и после взаимодействия с красителями на длинах волн 664 нм для МВ и 500 нм для СР, обработка экспериментальных результатов выполнена в рамках подходов, представленных в [1]. Образец $CoFe_2O_4$ показал высокую величину и скорость поглощения катионного красителя МВ. По мере увеличения x наночастицы предпочитали поглощать анионный краситель СР. Полученный результат показал, что электростатическое взаимодействие поверхности наночастиц и растворенных красителей не является доминирующим в механизме адсорбции в исследуемом случае. Кинетические кривые хорошо описываются моделью псевдо-второго порядка, а изотерма моделью моно-слойной адсорбции Ленгмюра.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда №23-22-10025, <https://rscf.ru/project/23-22-10025/>, Красноярского краевого фонда науки.

Список публикаций:

[1] Lin Ch.-R. et al. // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. 2371.

Исследование формирования магнитоэлектрических структур методом магнетронного распыления

Сыроварова Кристина Андреевна

Козонов Александр Юрьевич, Семенова Ксения Витальевна

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

crstnaa@icloud.com

На протяжении длительного времени ученые, проводя научные исследования магнитоэлектрического эффекта в композитных слоистых структурах, пользовались клеевой технологией для создания композиционных магнитоэлектрических структур [1].

С целью получения более качественной магнитоэлектрической структуры, исключая клеевые слои, следует рекомендовать метод магнетронного распыления.

Магнетронные распылительные системы (МРС) позволяют распылять практически все виды материалов, в том числе материалы, которые используются в качестве компонентов для создания магнитоэлектрических структур.

В работе [2] исследованы структурные, электрические и оптические свойства тонких графитоподобных пленок, полученных на кристаллическом кремнии и кварце методом магнетронного распыления при температурах подложки в диапазоне от 320 до 620°C. Из анализа установлено, что с ростом температуры подложки происходит увеличение характерного размера кристаллитов, уменьшение концентрации структурных дефектов и содержания аморфного углерода в фазовом составе пленок.

В работе [3] методом реактивного магнетронного распыления составных мишеней были синтезированы пленки титаната железа (ильменита), при содержании кислорода до 35 % были сформированы пленки с атомарно гладкой поверхностью и резкой границей раздела пленка-подложка толщиной ~ 100 нм, состоящие из Fe_2TiO_4 в структуре шпинели и оксидов титана Ti_3O_5 . Предложенная методика позволяет формировать пленки с размерами зерен 1—2 нм и регулярными порами размером ~ 3 нм.

В данный момент ведутся подготовительные эксперименты на установке EPOS-PVD-DESK-PRO по распылению никеля на пьезокерамическую подложку из ЦТС для создания магнитоэлектрической структуры Ni-PZT.

Целью эксперимента является получение двухслойной МЭ структуры и исследование ее свойств.

На рис. 1 представлена структура, которая будет получена в результате эксперимента.

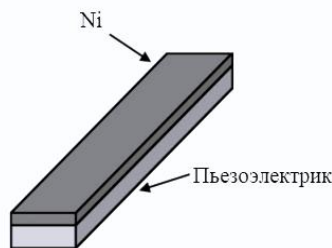


рис. 1 МЭ структура

Проведенные исследования распыления материалов, которые могут использоваться как компоненты многослойных структур, позволяют рассматривать метод магнетронного распыления в качестве перспективного способа формирования магнитоэлектрических композитов. Поиск новых методов и способов повышения создания качественных магнитоэлектрических структур позволит усовершенствовать существующие магнитоэлектрические устройства.

Список публикаций:

[1] Bichurin M., Petrov V. // *Modeling of magnetoelectric effects in composites, Springer series in material science, Volume 201, 2014, 108p.*

[2] Виноградов А. Я., Грудинкин С. А., Беседина Н. А., Коняхин С. В., Рабчинский М. К., Эйдельман Е. Д., Голубев В. Г. // *Структура и свойства полученных методом магнетронного распыления тонких графитоподобных пленок. Физика и техника полупроводников, 2018, том 52, вып. 7.*

[3] Логачева В. А., Бабушкина Е. В., Герасименко Ю. В., Максименко А. А., Афонин Н. Н., Ховив А. М. // *Формирование тонких пленок титаната железа методом реактивного магнетронного распыления в плазме ($\text{Ar}+\text{O}_2$) составных металлических мишеней Fe-Ti. Конденсированные среды и межфазные границы, Том 12, №4, 2010.*

Влияние термообработки на структуру и свойства наночастиц $\text{Fe}_{0.55}\text{Co}_{2.45}\text{O}_4$

Торопова Екатерина Сергеевна

Светлицкий Евгений Сергеевич

Сибирский федеральный университет

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН

Эдельман Ирина Самсоновна

topotova2002@gmail.com

Ферриты на основе кобальта со структурой шпинели и общей формулой $\text{Fe}_x\text{Co}_{3-x}\text{O}_4$, привлекают особое внимание, благодаря высокой магнитной анизотропии кобальта и возможности изменять их свойства за счет варьирования относительных концентраций магнитных компонент. FeCo_2O_4 , является важным ферромагнитным материалом с высокой температурой Кюри, большой коэрцитивной силой и значительной по величине намагниченностью насыщения. Большое влияние на физические свойства оказывает распределение магнитных катионов по тетраэдрическим и октаэдрическим позициям в структуре шпинели. Перераспределение катионов по позициям возможно при изменении технологических условий синтеза, например, температуры и времени термообработки. В последние годы классические применения ферритов дополнились их использованием в качестве адсорбентов различных красителей и ионов металлов, загрязняющих воду. Развитая площадь поверхности, легко адсорбирующая многие вещества, и простота магнитного извлечения из среды делают наноразмерные ферриты перспективными материалами в этой области.

Целью данной работы являлось выявление закономерностей изменения структурных и магнитных свойств наночастиц феррита состава $\text{Fe}_{0.55}\text{Co}_{2.45}\text{O}_4$ в зависимости от температуры и времени выдержки при определенных условиях синтеза. В работе также представлены результаты исследований адсорбционных свойств наночастиц по отношению к органическим красителям, катионному – метиленовый синий (methylene blue, MB) и анионному – Конго красный Congo red, CR). Рентгеновские дифрактограммы образцов приведены на рис.1. Положение и набор рефлексов соответствуют структуре шпинели. Установлено, что средний размер кристаллитов растет по мере увеличения температуры отжига – приблизительно в 5 раз при изменении температуры от 500 до 800 °С, в тоже время длительность термообработки не оказывает существенного влияния на размеры кристаллитов

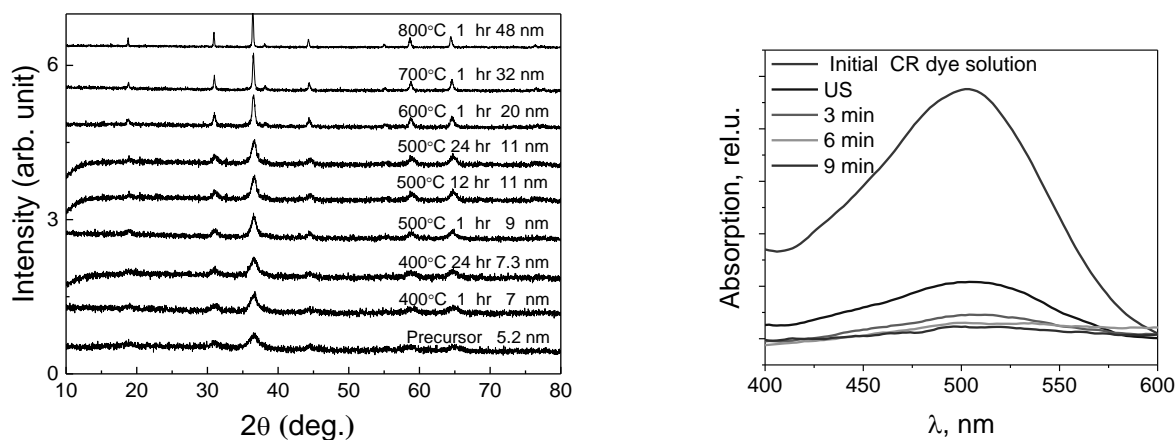


рис.1. Рентгеновские дифрактограммы образцов $\text{Fe}_{0.55}\text{Co}_{2.45}\text{O}_4$, полученных при различных температурах отжига и времени выдержки (слева); спектры оптического поглощения раствора красителя Конго красного в зависимости от времени взаимодействия с частицами исходного образца (прекурсора).

Для изучения магнитных свойств был использован магнитный круговой дихроизм (МКД) – магнитооптический эффект, величина которого прямо пропорциональна намагниченности образца. При всех режимах термообработки образцы исследованного состава демонстрируют МКД конечной величины, что свидетельствует о том, что во всех случаях наночастицы являются магнито-упорядоченными. В спектрах МКД образцов, подвергнутых отжигу при более высоких температурах, преобладает относительно узкий интенсивный положительный пик, центрированный вблизи 1.8 эВ, интенсивность которого возрастает приблизительно линейно по температуре, также как размер кристаллитов. Параметры второго положительного более широкого пика также, как и отрицательного пика в районе 2.5 эВ, сильнее зависят от температуры отжига. При этом основные особенности спектров позволяют сделать предположение, что они связаны с ионами кобальта и их изменения являются результатом перераспределения ионов Co^{2+} по октаэдрическим и тетраэдрическим позициям в структуре шпинели. Адсорбционные свойства наночастиц ферритов определялись по изменению интенсивности максимумов в спектрах оптического поглощения растворов красителей на длинах

волн 664 нм для MB и 500 нм для CR до и после взаимодействия с наночастицами. Выявлена предпочтительная адсорбция анионного красителя. В качестве примера на рис. 1 справа приведены спектры оптического поглощения красителя CR в зависимости от времени взаимодействия с частицами. Видно, что за 9 мин взаимодействия наночастиц и раствора красителя степень удаления красителя составляет более 90 %, что проявляется в осветлении красителя и резком уменьшении полосы поглощения раствора красителя.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда №23-22-10025, <https://rscf.ru/project/23-22-10025/>, Красноярского краевого фонда науки.

Список публикаций:

[1] Xie J. et al. // *Ceramics International*. 2021. Т. 47. №. 9. С. 11993.