

6 - Магнетизм

Зуева Екатерина Андреевна, 3 курс

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

Магнитоэлектрический микрополосковый СВЧ датчик

Лобекин Вячеслав Николаевич,

e-mail: Ekaterina.Zueva@novsu.ru стр. 41

Иванов Сергей Вадимович, 3 курс

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

Применение магнитоэлектрического гиратора в РЭА

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

e-mail: sivanovvad@mail.ru стр. 42

Ивашева Елена Евгеньевна, 2 курс

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

Исследование магнитоэлектрических структур с различной магнитострикционной фазой на основе сплавов АМАГ

Бичурин Мирза Имамович, Д.ф.-м.н.

e-mail: ellen9879@yandex.ru стр. 44

Козонов Александр Юрьевич, 4 курс

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

Магнитоэлектрический диод на основе магнитострикционно-пьезополупроводниковой структуры

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

e-mail: s241716@std.novsu.ru стр. 45

Кузьмин Евгений Валентинович, аспирант 2 года обучения

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

Исследование магнитоэлектрического эффекта в структурах Метглас/GaAs/Метглас и Метглас/SiC/Метглас

Петров Роман Валерьевич, д.ф.-м.н.

e-mail: 7777744444@mail.ru стр. 46

Леонтьев Виктор Сергеевич, зав. лаб.

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

Применение магнитоэлектрического датчика в беспроводной системе измерения тока

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

e-mail: viktorsergeevich.novsu@gmail.com стр. 48

Леонтьев Виктор Сергеевич, м.н.с.

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

Датчик тока на основе самонамагничивающей структуры LiNbO₃/Ni/Metglas

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

e-mail: viktorsergeevich.novsu@gmail.com стр. 50

Лобекин Вячеслав Николаевич, аспирант 3 года обучения

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

Моделирование сплит-кольцевого резонатора со структурой метаматериалов с ферритовым элементом

Татаренко Александр Сергеевич, к.т.н.

e-mail: slavalobekin@gmail.com стр. 53

Лобекин Вячеслав Николаевич, инженер-исследователь
Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, отделение электроники

Магнитоэлектрический магнитокардиометр

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.
e-mail: slavalobekin@gmail.com стр. 51

Мухамадеева Виктория Владимировна, магистрант 1 года обучения
Уфа, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт

Структура и динамика связанных вихрей в СТНО под воздействием спин-поляризованного тока

Екомасов Евгений Григорьевич, д.ф.-м.н.
e-mail: mukhamadeeva.vika@mail.ru стр. 54

Орехова Светлана Михайловна, 2 курс
Ставрополь, Северо-Кавказский федеральный университет, физико-технический

Фрагментация падающих капель магнитной жидкости

Закинян Артур Робертович, д.ф.-м.н.
e-mail: lanafox189@mail.ru стр. 56

Петров Дмитрий Александрович, 2 курс
Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, аспирантура (отделение электроники)

Магнитоэлектрический резистор на основе магнитострикционно - пьезополупроводниковой структуры Metglas/GaAs/Metglas"

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.
e-mail: s182335@std.novsu.ru стр. 57

Ромазев Павел Евгеньевич, магистрант 2 года обучения
Челябинск, Челябинский государственный университет, физический

Магнитоэлектрический эффект в объемных мультиферроидных композиционных материалах

Лупицкая Юлия Александровна, к.ф.-м.н.
e-mail: paulcoolpaul174@gmail.com стр. 58

Семенова Ксения Витальевна, 4 курс
Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Отделение электроники

Магнитоэлектрический тиристор

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.
e-mail: semenovaksu@icloud.com стр. 59

Сыроварова Кристина Андреевна, 4 курс
Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, отделение электроники

Магнитоэлектрический транзистор

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.
e-mail: crstnaa@icloud.com стр. 60

Филиппов Михаил Александрович, магистрант 1 года обучения
Уфа, Башкирский государственный университет, физико-технический институт

Процессы перемангничивания магнитоодонсных плёнок с колумнарным дефектом в перпендикулярном и плоскостном полях

Вахитов Роберт Миннисламович, д.ф.-м.н.
e-mail: mikhail.filippov.99@mail.ru стр. 61

Магнитоэлектрический микрополосковый СВЧ датчик

Зуева Екатерина Андреевна

Ивашева Елена Евгеньевна

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Лобекин Вячеслав Николаевич

Ekaterina.Zueva@novsu.ru

Сочетание магнитных и электрических свойств, а также свойств, обусловленных магнитоэлектрическим (МЭ) взаимодействием в слоистой феррит-пьезоэлектрической структуре, открывает широкие возможности для создания новых СВЧ датчиков. Такие датчики на МЭ микроволновом эффекте широко используются в промышленности, медицине, окружающей среде и многих других областях.

Предлагаемый МЭ микрополосковый СВЧ датчик работает на обратном резонансном МЭ эффекте, представляющим собой сдвиг линии ферромагнитного резонанса (ФМР) во внешнем постоянном электрическом поле [1]. Резонансный обратный МЭ эффект в феррит-пьезоэлектрических композитах реализуется приложением электрического поля к пьезоэлектрической фазе, за счёт пьезоэлектрического эффекта возникает деформация, которая передается на ферритовую фазу, в результате магнитострикции происходит МЭ микроволновый эффект. На основе МЭ структур разрабатываются такие устройства как: фазовращатели, аттенюаторы, модуляторы, переключатели, фильтры, датчики мощности, а с использованием нелинейного МЭ эффекта также ограничители, умножители, генераторы [2].

Практический анализ МЭ материалов показывает, что многослойные композитные структуры на основе пьезоэлектрических и ферритовых материалов следует считать наиболее эффективными в микроволновом диапазоне поскольку в них МЭ эффект достигает максимальной величины. Монокристаллический железиттриевый гранат (ЖИГ) имеет самую узкую ширину линии ФМР, поэтому многие МЭ СВЧ устройства основаны на сочетании ЖИГ монокристалла с пьезоэлектрическим материалом. Ширина кривой у лучших образцов ЖИГ порядка 0,1-0,2 Э.

На рис.1 представлена конструкция отражательного МЭ СВЧ датчика на основе феррит-пьезоэлектрической структуры, использующей пластинки монокристаллического ЖИГ и поляризованного ЦТС с толщинами 0,25 мм. Конструкция выполнена на подложке из фольгированного материала марки ФЛАН-10. Основой конструкции МЭ датчика является микрополосковая линия передачи со шлейфами длиной $3\lambda/8$, $1/8\lambda$, благодаря которым создается круговая поляризация магнитного поля в области резонатора. Шлейф $1/4\lambda$ КЗ используется для согласования линии.

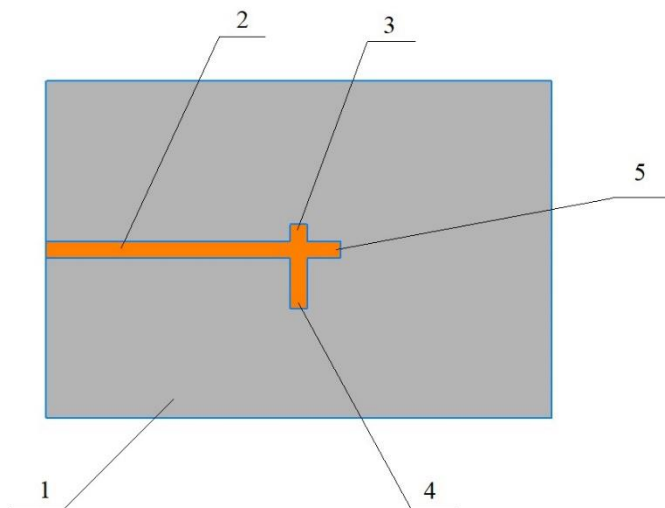


рис. 1-Конструкция МЭ СВЧ датчик: 1 - подложка ФЛАН-10; 2 - микрополосковая линия передачи; 3 - шлейф $1/8\lambda$; 4 - шлейф $3/8\lambda$; 5 - шлейф $1/4\lambda$ КЗ

Принцип работы микрополоскового МЭ СВЧ датчика заключается в микроволновом МЭ эффекте. Композитная МЭ структура на основе пьезоэлектрика ЦТС и феррита ЖИГ, используемая в качестве резонатора, размещается в область круговой поляризации микроволнового магнитного поля. При подаче внешнего электрического поля МЭ СВЧ датчик реагирует на поле, вследствие чего, в пьезоэлектрической фазе резонатора происходит деформация, которая передается на ферритовую фазу, в результате происходит сдвиг резонансной линии.

Разработка данного МЭ СВЧ датчика является перспективным направлением развития СВЧ-техники, поскольку такие устройства имеют существенные преимущества и перспективы в областях биомедицины, промышленном производстве и других сферах.

Список публикаций:

- [1] Bichurin M.I. and Petrov V.M. Composite magnetolectrics: their microwave properties // *Ferroelectrics*. 1994.V. 162. P. 33-36.
 [2] Бичурин М.И. Магнитоэлектрические материалы и их применение в технике СВЧ // *Вестник НовГУ, Сер.: Естеств. и техн. науки*, 2001, No 19, с. 7-12.

Применение магнитоэлектрического гиратора в РЭА

Иванов Сергей Вадимович

Леонтьев Виктор Сергеевич

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мурза Имамович, д.ф.-м.н.

sivanovvad@mail.ru

Гиратор – это схема преобразования, которая может инвертировать импеданс цепи, т.е. имитировать индуктивность с помощью емкости и, наоборот, емкость с помощью индуктивности, а также преобразовывать ток в напряжение и напряжение в ток.

Гиратор в идеальном случае соответствует формулам:

$$U_1 = -R \cdot I_2, \quad (1)$$

$$U_2 = R \cdot I_1, \quad (2)$$

где U_1, I_1 – напряжение и ток на входе, U_2, I_2 – напряжение и ток на выходе, R – сопротивление гиратора.

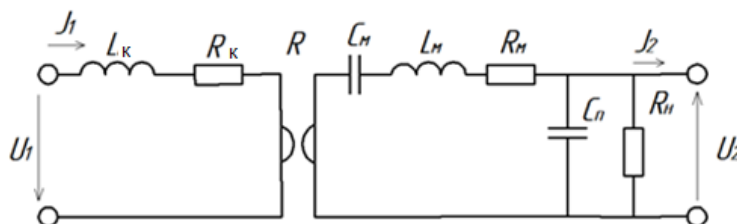


рис.1 Эквивалентная схема магнитоэлектрического гиратора

Целью исследования является возможность использования магнитоэлектрического (МЭ) гиратора в радиоэлектронной аппаратуре.

МЭ гиратор может быть реализован на основе катушки индуктивности для создания переменного магнитного поля и слоистой МЭ структуры из пьезоэлектрических и магнитострикционных фаз.

МЭ материал обладает прямым и обратным МЭ эффектом, благодаря которому выполняются функции гиратора - происходит преобразование переменного магнитного поля H_A на входе в U_2 на выходе, что соответствует прямому МЭ эффекту – через деформацию магнитострикционной компоненты появляется поляризация пьезоэлектрической компоненты материала. Для описания МЭ эффекта используют МЭ коэффициент по напряжению

$$a_E = \frac{E_2}{H_A} = \frac{U_2}{H_A \cdot t}, \quad (3)$$

определяющий отношение индуцированного электрического поля в пьезоэлектрической компоненте к магнитному полю, прикладываемому к магнитной компоненте. a_E можно считать сопротивлением гиратора, которое зависит от множества факторов: частоты колебаний МЭ материала, механической связи между фазами материала, объёмного соотношения между фазами материала и т. д.

В связи со стремлением уменьшить габаритные размеры и повысить КПД современных РЭС МЭ гиратор может быть использован в качестве замены маломощных импульсных трансформаторов.

Результаты исследования недавно разработанных МЭ гираторов позволяют выделить несколько главных моментов относительно их проектирования:

МЭ гиратор, материал которого состоит из ЦТС и Метгласа, имеет высокий КПД преобразования магнитного поля в электрическое поле $\eta_g = 93,2\%$ при низкой прикладываемой к МЭ материалу мощности ($P_{вх} = 1$ Вт).

МЭ коэффициент по напряжению должен иметь большое значение для хорошего преобразования мощности, прикладываемой к МЭ гиратору.

Для линейаризации МЭ-свойств материалов без постоянного подмагничивающего поля H_b , требуется использовать дополнительный магнитострикционный материал, который создаст внутреннее магнитное поле в МЭ структуре.

Отношение длины к ширине L/W МЭ структуры должно быть наибольшим для увеличения плотности магнитного потока, а также ориентация магнитных полей должна быть в плоскости МЭ структуры для уменьшения размагничивающих факторов.

Достоинства МЭ гиратора: небольшие размеры по сравнению с обычными трансформаторами, высокий КПД при низкой входной удельной мощности. Недостатки МЭ гиратора: работа при наличии постоянного внешнего магнитного поля, эффективное преобразование $I_{вх}/V_{вх}$ и $V_{вх}/I_{вх}$ только на резонансной частоте материала.

С учетом особенностей проектирования МЭ гиратора была разработана МЭ структура, состоящая из слоя ЦТС размерами $12*1*0,5$ мм³ и двух слоев Метгласа с никелевым напылением снизу и сверху образца с размерами $12*1*0,03$ мм³ (толщина Метгласа 25 мкм, толщина Ni 5 мкм для каждого слоя), $\frac{L}{W} = 12$. МЭ образец был помещен в катушку индуктивности с 65 витками медной проволоки с радиусом сечения 0,4 мм, катушка была намотана на пластиковый полый каркас с радиусом поперечного сечения 1,7 см.

Проведены измерения электрического напряжения, возникающего в образце при МЭ эффекте в области электромеханического резонанса, и вычислены значения a_E по формуле (3). Результаты приведены в таблице:

Амплитуда напряжения в МЭ материале при резонансе U_2 , мВ	Частота электромеханического резонанса МЭ образца $f_{рез}$, кГц	Напряженность внешнего магнитного поля от постоянного магнита H_b , Э	Амплитуда переменного магнитного поля от катушек H_A , А/м	Величина МЭ коэффициента по напряжению на частоте резонанса a_E , В/А
20	79	0	0,4	100
19	80	2,6		140
28	80	5		95
25	80	0	1,8	28
20	80	2,6		59
53	76	5		22
37	83	0	5,5	13
25	78	2,6		23
63	83	5		9

По итогам работы можно сделать следующий вывод: разработанный МЭ гиратор обладает недостаточно высоким значением a_E , но демонстрирует возникновение МЭ эффекта в отсутствии внешнего магнитного поля H_b от постоянного магнита. Авторы планируют продолжить исследования с целью реализации МЭ гиратора с улучшенными параметрами.

Список публикаций:

[1] М.И. Бичурин, В.М. Петров, Д.А. Филиппов, Г. Сринивасан Магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2005. – 231 с.
 [2] Xin Zhuang, Christophe Dolabdjian, Chung Ming Leung u др.; Dimension effects of a magnetoelectric gyator with FeCoSiB/Pb(Zr, Ti)O3 layered composites core for efficient power conversion. - Sensors and Actuators A: Physical, 2019.
 [3] Chung Ming Leung, G. Sreenivasulu, Xin Zhuang u др. A Highly Efficient Self-Biased Nickel-Zinc Ferrite/Metglas/PZT Magnetoelectric Gyator. - Phys. Status Solidi RRL, 2018

Исследование магнитоэлектрических структур с различной магнитострикционной фазой на основе аморфных сплавов АМАГ

Ивашева Елена Евгеньевна

Зуева Екатерина Андреевна

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

ellen9879@yandex.ru

В последнее время активно изучается магнитоэлектрический эффект в магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах. Наиболее популярными магнитострикционными материалами являются никель, сплавы ферриты никеля и кобальта, галфенол, терфенол-D, Метглас. На сегодняшний день магнитомягкие аморфные сплавы типа Метглас уже используются для создания высокочувствительных датчиков, например, в биомедицине. Однако широкие исследования при выборе данных материалов для практического применения не проводились. Поэтому проведение подробных теоретических и экспериментальных исследований аморфных сплавов различных марок является актуальной задачей.

В настоящем исследовании были использованы магнитомягкие аморфные сплавы АМАГ, изготавливаемые на ПАО «Мстатор» (г. Боровичи). Исследуемые композитные структуры были изготовлены с использованием лент следующих марок: АМАГ180, АМАГ170, АМАГ200, АМАГ203, АМАГ225 (нанокристаллическая лента), АМАГ321, АМАГ324, АМАГ493, АМАГ187 и две немаркированные ленты того же производителя (в таблице и на (рис.1), обозначенные как АМАГХ и АМАГZ).

Экспериментальное исследование магнитомягких аморфных сплавов проводилось на магнитоэлектрических композитах. Исследуемые образцы были выполнены на основе пьезокерамики ЦТС. На пластину ЦТС размерами 30×10×0,5 мм были нанесены с каждой стороны по 3 пластины Метгласа, внешние пластины которого были на 5 мм длиннее, для пайки выводов. Соединение слоев производилось с помощью клея БФ-2. Для создания минимальной и равномерной толщины клеевых прослоек исследуемые образцы помещались под пресс с нагревом до температуры 100°C в течение 60 мин.

Измерения образцов производились в области электромеханического резонанса в режиме продольной моды на измерительном стенде, состоящем из генератора переменных сигналов Agilent 33500В, осциллографа Nameg НМО722, источника питания Актаком APS-3203, постоянного магнита, катушки индуктивности и магнитометра Dexing Magnet DX-180. Стенд работает следующим образом: на катушку индуктивности подается переменный сигнал с генератора, который создает переменное магнитное поле. С помощью постоянного магнита создается оптимальное постоянное магнитное поле. В результате воздействия переменного и постоянного магнитных полей, вследствие поперечного магнитоэлектрического эффекта, на обкладках образца индуцируется электрический сигнал, который фиксируется осциллографом.

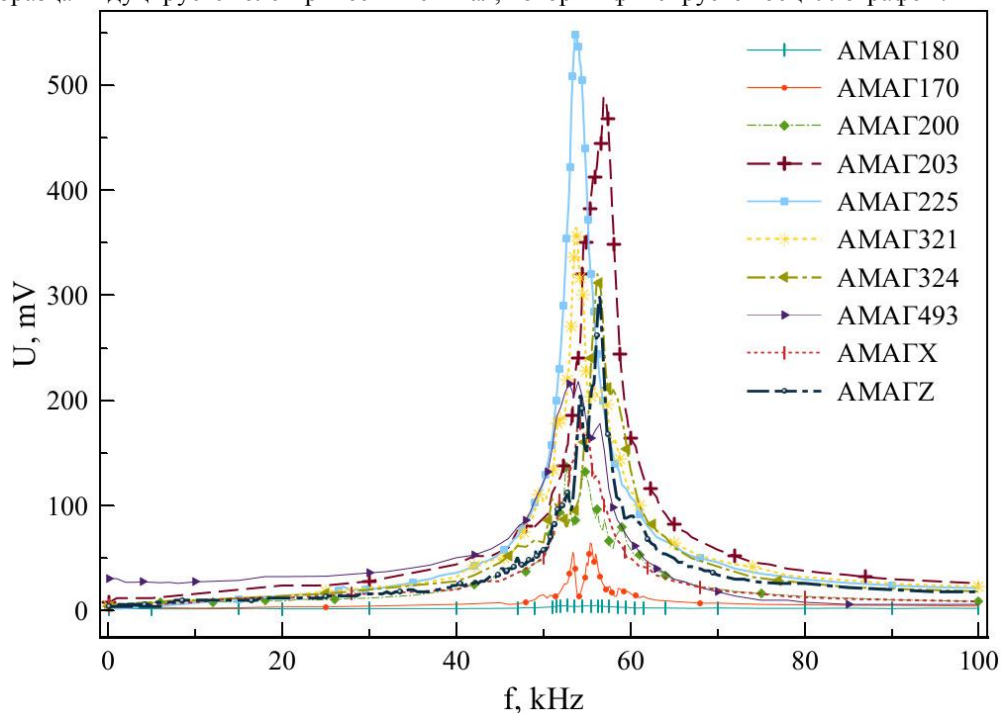


рис.1. Зависимость выходного напряжения от частоты

На (рис.1) представлена зависимость выходного напряжения от частоты для образцов с разными марками лент АМАГ.

Марка ленты	АМАГ 170	АМАГ 180	АМАГ 187	АМАГ 200	АМАГ 203	АМАГ 225	АМАГ 321	АМАГ 324	АМАГ 493	АМАГ X	АМАГ Z
Основа	Со	Со	-	Нано	-	Fe-Ni	Fe, Fe-Co	Fe, Fe-Co	Fe, Fe-Co	-	-
Максимальное выходное напряжение U_{\max} , мВ	4,8	64,4	-	136,8	488	548	364	320	218	180	298
Резонансная частота f_r , кГц	52,7	55,4	-	52,6	57	53,7	53,7	56,2	54	54	56,45
Напряженность магнитного поля H , Э	4	5	-	8,5	15	4,8	7	11	13,3	9	12,8

В таблице представлены данные, полученные в результате исследования образцов с различными марками лент АМАГ. Наибольшие максимальные выходные напряжения были получены с использованием лент марок АМАГ225 ($U_{\max} = 548$ мВ на частоте $f_r = 53,7$ кГц), АМАГ203 ($U_{\max} = 488$ мВ на частоте $f_r = 57$ кГц) и АМАГ321 ($U_{\max} = 364$ мВ на частоте $f_r = 53,7$ кГц), что следует связать, на наш взгляд, с возросшим пьезомагнитным коэффициентом. На образце с лентой марки АМАГ187 не были зафиксированы изменения выходного напряжения.

В результате проведенного экспериментального исследования были выявлены марки лент АМАГ с наибольшими показателями максимального выходного напряжения. Планируется продолжение исследований с целью выяснения механизма наблюдаемого эффекта.

Список публикаций:

- [1] Бичурин М.И., Петров Р.В., Соловьев И.Н., Соловьев А.Н. Исследование магнитоэлектрических сенсоров на основе пьезокерамики ЦТС и Метгласа // *Современные проблемы науки и образования* – 2012. - №1
 [2] Петров В.М., Бичурин М.И. Магнитоэлектрический эффект в симметричных и асимметричных магнитострикционно-пьезоэлектрических слоистых структурах // *Современные проблемы науки и образования* – 2013. - №4

Магнитоэлектрический диод на основе магнитострикционно-пьезополупроводниковой структуры

Козонов Александр Юрьевич

Петров Дмитрий Александрович

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

s241716@std.novsu.ru

В настоящее время существует множество разновидностей диодов. Классифицируются данные устройства по своему функциональному назначению, размеру и характеру электрического перехода, мощности рассеивания, частотному диапазону и материалу диода. Среди всех видов данных приборов в данном исследовании выделяются те, чья вольтамперная характеристика изменяется под действием магнитного поля, т. е. магнитодиоды [1]. Несмотря на то, что подобные устройства успешно и активно изготавливаются и используются на практике, они не обладают слишком высокой магнитной чувствительностью. Устройствами с более высокой магнитной чувствительностью являются предлагаемые магнитоэлектрические диоды, работающие на магнитоэлектрическом (МЭ) эффекте. Основным преимуществом МЭ диодов является сравнительно малая величина подмагничивающего поля порядка 10 - 100 Э, в отличие от магнитных диодов, где эта величина составляет порядка 1000 Э.

Структура МЭ диода основана на идее “pin-диода”, в качестве высокоомной i-области предлагается использовать композиционную магнитострикционно-пьезополупроводниковую структуру (рис. 1). В качестве пьезополупроводниковой пластины предполагается использовать арсенид галлия GaAs, в качестве магнитострикционной – Метглас, пермендюр или никель.

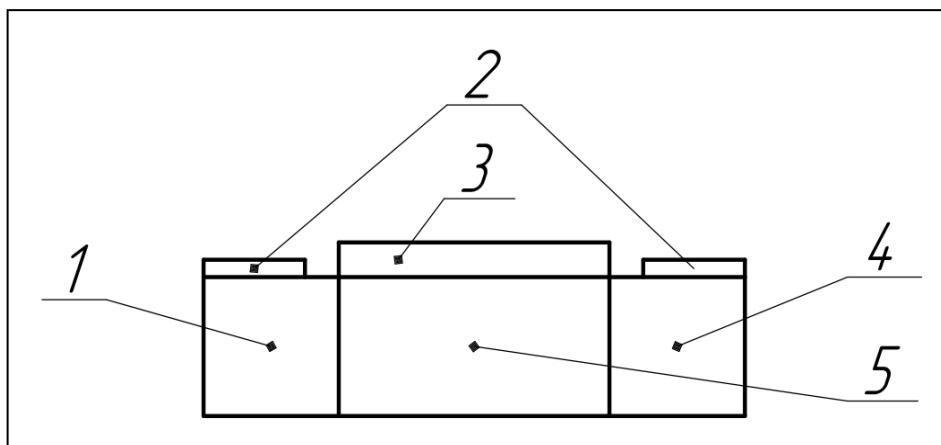


рис.1.: структура магнитоэлектрического диода: 1 – p-область, 2 – омические контакты, 3 – магнитострикционный слой, 4 – n-область, 5 – высокоомная область подложки из GaAs

Принцип работы МЭ диода заключается в следующем: возникающие под действием магнитного поля механические деформации в магнитострикционном слое передаются пьезополупроводниковому слою, что приводит к модуляции сопротивления базы диода и изменению вольтамперной характеристики.

Величина МЭ эффекта, заключающегося в возникновении электрической поляризации во внешнем магнитном поле и в намагничивании во внешнем электрическом поле, резко возрастает в области электромеханического резонанса [2]. Соответственно, чем больше величина данного эффекта, тем большую магнитную чувствительность прибора мы получим.

Одной из задач разработки новых устройств является создание многофункциональных устройств, работающих в широком частотном диапазоне. Поэтому стоит учитывать, что особенностью электромеханического резонанса является его довольно высокая частота; для её снижения в случае необходимости целесообразно в качестве высокоомной области использовать вышеупомянутый композит с градиентом намагниченности, работающий в области изгибных колебаний электромеханического резонанса [3].

Магнитоэлектрические диоды могут использоваться в разработке датчиков тока, магнитного и электромагнитного полей, преобразователей, устройств систем безопасности, навигации, медицинского оборудования и т. д.

Список публикаций:

- [1] Бараночников М. Л. // Микромагнитоэлектроника. Т. 1. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 544 с.: ил.
 [2] Бичурин М. И., Петров В. М., Филиппов Д. А., Сринивасан Г. // Магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2005. – 226 с.
 [3] Магнитоэлектрический диод с внутренним магнитным полем: Патент РФ №2744931: МПК H01L, 43/08, 43/10 / Иванов С. Н., Бичурин М. И., Семенов Г. А.; ФГБОУ ВО НовГУ. - №2020120029; заявл. 09.06.2020; опубл. 17.03.2021

Исследование магнитоэлектрического эффекта в структурах Метглас/GaAs/Метглас и Метглас/SiC/Метглас

Кузьмин Евгений Валентинович

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Петров Роман Валерьевич, д.ф.-м.н.

7777744444@mail.ru

В последние годы интенсивно изучается магнитоэлектрический (МЭ) эффект в магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах для создания различного рода высокочувствительных сенсоров нового поколения. В материалах такого рода МЭ эффект проявляется как результат взаимодействия магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз компонентов, т.е. электрическая поляризация индуцируется внешним переменным магнитным полем в присутствии подмагничивающего поля – прямой МЭ эффект. Значение МЭ эффекта характеризуется МЭ коэффициентом по напряжению α . Практически, для расчета МЭ коэффициентов приходится решать множество сложных аналитических уравнений.

В большинстве монокристаллических магнитоэлектриков (Cr_2O_3 и др.) МЭ эффект незначителен и его величина не превышает $20 \text{ мВ}/(\text{см}\cdot\text{Э})$, и наблюдается, как правило, при низких температурах или в больших магнитных полях, что ограничивает их практическое применение. Значительно больший по величине МЭ эффект обнаружен в композитных структурах, содержащих магнитострикционную и пьезоэлектрическую фазы. Таким образом, использование композитных структур открывает широкие возможности для практического применения МЭ материалов [1].

В настоящее время, как за рубежом, так и в России большое внимание уделяется исследованию физических свойств материалов, характеризующихся несколькими типами упорядочения (сегнетоэлектрическим, ферромагнитным, упругим и т.п.), т.е. мультиферроиков [1-3]. Это обусловлено возможностью использования мультиферроиков для создания многофункциональных электронных устройств. Взаимодействие между различными параметрами упорядочений в мультиферроиках может приводить к новым эффектам, например к магнитоэлектрическому (МЭ) эффекту. Композиционные МЭ мультиферроики, содержащие пьезоэлектрическую и магнитострикционную фазу, обладают гигантским МЭ эффектом при комнатной температуре по сравнению с однофазными МЭ материалами, что делает их перспективными для технических применений. В материалах такого рода МЭ эффект проявляется как результат взаимодействия магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз компонентов. Электрическая поляризация индуцируется внешним переменным магнитным полем в присутствии подмагничивающего поля, или индуцированная намагниченность появляется при приложении электрического поля. Количественно МЭ эффект характеризуется МЭ коэффициентом по напряжению α_E , равным отношению индуцированного переменного электрического поля к приложенному магнитному переменному полю в условиях разомкнутой электрической цепи. Величина коэффициента определяется геометрией, магнитными, диэлектрическими и механическими параметрами составляющих её компонентов и частотой магнитного поля [3-5].

Измерения проводились на измерительном стенде, включающем в себя генератор сигналов Nameg НМF2550, постоянный магнит, катушку индуктивности, осциллограф Nameg НМO722 и магнитометр. Стенд работает следующим образом: на катушку индуктивности подается сигнал генератора, который создает переменное магнитное поле $H\sim$, величиной в 1 Э. Далее, постоянным магнитом создается оптимальное постоянное магнитное поле, которое составляет 30 Э (поле смещения). В результате поперечного магнитоэлектрического эффекта создается переменный электрический сигнал, который фиксируется осциллографом.

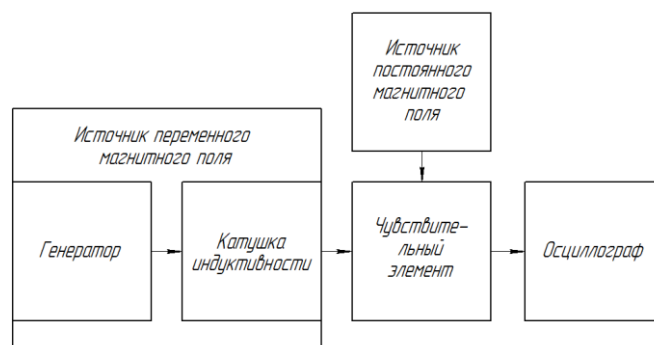


рис. 1. Структурная схема измерительного стенда

В данной работе исследовались слоистые структуры, состоящие из полупроводниковых пьезоэлектрических материалов GaAs [001] (толщиной 0,5 мм) и гексагональный политип 4H-SiC [0001] (толщиной 0,35 мм) с размерами 25x5 мм и обкладок Метгласа переменной толщины, которые одновременно служат электродами. Пластины Метгласа соединялись с полупроводниковыми материалами GaAs и SiC посредством клея, толщина клеевого слоя не превышает 1 мкм. С каждой стороны образца приклеены по 3 пластины Метгласа, внешняя пластина на 5 мм длиннее, для пайки выводов. Конструкции Метглас/GaAs/Метглас и Метглас/SiC/Метглас исследуемых МЭ элементов приведены на (рис. 2).

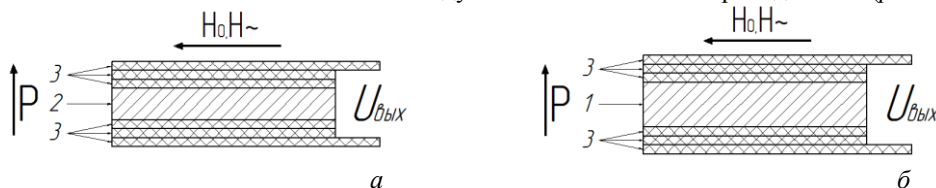


рис. 2. Конструкции Метглас/SiC/Метглас элементов: а – SiC структура; б – Метглас/GaAs/Метглас структура

Полученные результаты измерений представлены на (рис.3).

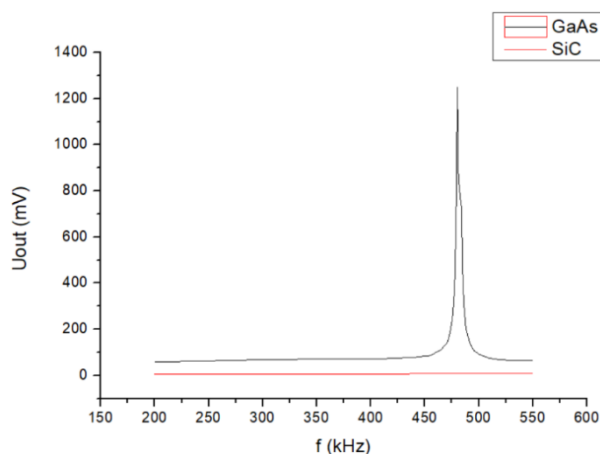


рис. 3. График зависимости выходного напряжения от частоты в исследуемых структурах

Из выше представленного графика видно, что резонансная частота составила 480,2 кГц для структуры Метглас/GaAs/Метглас, величина МЭ коэффициента по напряжению составила 2,5 В/(см·Э).

В результате проведенных экспериментальных исследований на измерительном стенде (рис. 1) МЭ эффект наблюдался только в структуре Метглас/GaAs/Метглас. Исследованы структуры Метглас/GaAs/Метглас в области электромеханического резонанса и структуры Метглас/SiC/Метглас.

Список публикаций:

- [1] M.I. Bichurin, V.M. Petrov, and G. Srinivasan. Modeling of magnetoelectric effect in ferromagnetic/piezoelectric multilayer composites // *Ferroelectrics*, vol. 280, pp. 165–175, 2002.
- [2] M.I. Bichurin, V.M. Petrov, and G. Srinivasan. Theory of low-frequency magnetoelectric effects in ferromagnetic-ferroelectric layered composites // *Journal of Applied Physics*, vol. 92, no. 12, pp. 7681–7683, 2002.
- [3] *Magnetoelectricity in Composites* // Eds. M. Bichurin and D. Viehland / Pan Stanford Publishing, Singapore 2011. – 286 p.
- [4] Бичурин М.И., Петров Р.В., Соловьев И.Н., Соловьев А.Н. Исследование магнитоэлектрических сенсоров на основе пьезокерамики ЦТС и Метгласа // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 1.
- [5] Петров В.М., Бичурин М.И. Магнитоэлектрический эффект в симметричных и асимметричных магнитоэлектрических слоистых структурах // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 4.

Применение магнитоэлектрического датчика в беспроводной системе измерения тока

Леонтьев Виктор Сергеевич

Саплев Алексей Фёдорович

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Иمامович, д.ф.-м.н.

viktorsergeevich.novsu@gmail.com

Датчики тока являются очень важным типом электронных устройств. Существует большое количество датчиков тока, работающих на основе различных физических явлений. Наиболее распространенными являются магниторезистивные и датчики Холла [1]. Несмотря на то, что магнитоэлектрические (МЭ) датчики тока имеют небольшие размер и вес, а также высокую чувствительность, в публикациях им уделяется мало внимания по сравнению с МЭ датчиками магнитного поля [2]. Также на сегодняшний день отсутствуют МЭ датчики тока, готовые к практическому использованию. В данном исследовании авторами предлагается разработка и новое применение МЭ датчика тока в системах измерения постоянного и переменного тока в диапазоне 10 – 10 000 А.

Для улучшения выходных характеристик МЭ датчика тока замкнутого типа планируется использовать в качестве чувствительного элемента композит на основе бидоменной структуры Metglas / LiNbO₃ / Metglas. Известно, что использование бидоменных структур в магнитоэлектрических композитах повышает чувствительность системы. Ранее был рассмотрен датчик тока на основе магнитоэлектрического композита Metglas-PZT-Metglas [3] с использованием внешнего магнитного поля 15 Э. Диапазон ранее экспериментально исследованных датчиков тока составлял от 10 А до 100 А. В случае использования в качестве чувствительного элемента системы измерения тока композита на основе бидоменной структуры Metglas / LiNbO₃ / Metglas со следующими толщинами слоев, например, ниобат лития - 0,5 мм, Metglas - 29 мкм можно добиться снижения шумов конструкции и как следствие увеличения чувствительности

системы. Дополнительным преимуществом систем измерения тока на основе ниобата лития является отсутствие свинцового компонента в чувствительном элементе. Предварительные оценки показывают, что МЭ коэффициент в предлагаемой структуре достигает величины $500 \text{ В / см} \cdot \text{Э}$. Ранее проведенные экспериментальные исследования подтверждают, что бидоменные структуры на основе LiNbO_3 , Metglas и Ni могут быть использованы в качестве элемента для создания высокочувствительных датчиков тока без внешних подмагничивающих полей [4].

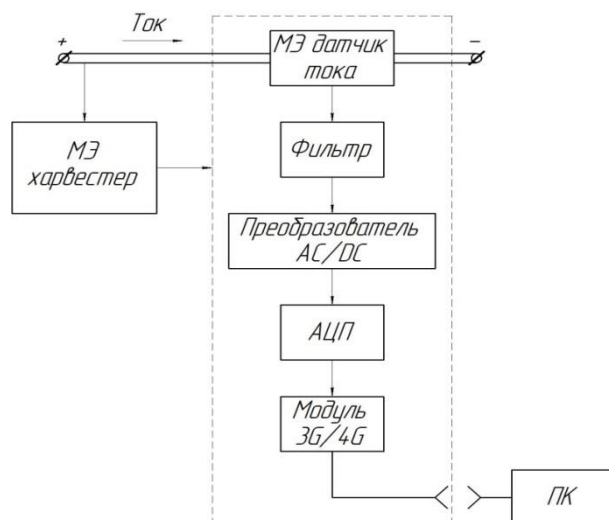


рис.1. Структурная схема беспроводной системы измерения тока на основе магнитоэлектрического датчика.

Принцип работы такой системы заключается в следующем: собранная информация МЭ датчиком передается на терминал (ПК) через удаленную сеть. Вначале измеряемый сигнал с датчика поступает на фильтр и преобразователь, после чего аналоговый сигнал посредством АЦП преобразуется в цифровой и поступает на облачный сервер посредством модуля 3G/4G. Полученные данные можно анализировать как в реальном времени, так и в заданном промежутке времени. На рис.1 также показано устройство сбора энергии - МЭ харвестер, который преобразует энергию магнитного поля измеряемого проводника с током в электрическую энергию [5]. За счет использования данного МЭ харвестера происходит питание всех измерительных модулей системы.

Использование бидоменной структуры позволит значительно снизить уровень магнитного шума, повысить чувствительность, а также уменьшить габаритные размеры устройства, поскольку нет необходимости использовать постоянный магнит и усилитель.

Предлагаемая система может измерять токи диапазоне $10 - 10\,000 \text{ А}$ и использоваться в измерительной технике; в электрических сетях, системах управления и системах безопасности; в металлоискателях; в автомобильной промышленности; на железнодорожном транспорте; в беспроводных системах учета; в космической технике и робототехнике; в биомедицине.

Преимуществами датчика тока на основе бидоменной структуры на основе LiNbO_3 являются высокая чувствительность, низкое энергопотребление, высокая точность и большой диапазон измеряемых токов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00391.

Список публикаций:

- [1] Mirza Bichurin, Roman Petrov, Viktor Leontiev, Oleg Sokolov, Andrei Turutin, Victor Kuts, Ilya Kubasov, Alexander Kislyuk, Alexander Temirov, Mikhail Malinkovich, Yuriy Parkhomenko Self-biased bidomain $\text{LiNbO}_3/\text{Ni}/\text{Metglas}$ magnetoelectric current sensor // *Sensors* 2020, 20, 7142; doi:10.3390/s20247142
- [2] Bichurin, M.; Petrov, R.; Sokolov, O.; Leontiev, V.; Kuts, V.; Kiselev, D.; Wang, Y. Magnetoelectric Magnetic Field Sensors: A Review. *Sensors* 2021, 21, 6232. <https://doi.org/10.3390/s21186232>.
- [3] Bichurin, M.; Petrov, R.; Leontiev, V.; Semenov, G.; Sokolov, O. Magnetoelectric Current Sensors. *Sensors* 2017, 17, 1271. <https://doi.org/10.3390/s17061271>.
- [4] Bichurin, M.I., Sokolov, O.V., Leontiev, V.S., Petrov, R.V., Tatarenko, A.S., Semenov, G.A., Ivanov, S.N., Turutin, A.V., Kubasov, I.V., Kislyuk, A.M., Malinkovich, M.D., Parkhomenko, Y.N., Kholkin, A.L. and Sobolev, N.A. (2020), Magnetoelectric Effect in the Bidomain Lithium Niobate/Nickel/Metglas Gradient Structure. *Phys. Status Solidi B*, 257: 1900398. <https://doi.org/10.1002/pssb.201900398>
- [5] Song, M. E., Yan, Y., Gollapudi, S., Bichurin, M., Petrov, V., Sanghadasa, M., & Priya, S. (2017). Design of Metglas/polyvinylidene fluoride magnetoelectric laminates for energy harvesting from power cords. In *IEEE Sensors, SENSORS 2016 - Proceedings [7808818] (Proceedings of IEEE Sensors)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2016.7808818>

Датчик тока на основе самомагничивающейся структуры $\text{LiNbO}_3/\text{Ni}/\text{Metglas}$

Леонтьев Виктор Сергеевич

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

Viktorsergeevich.novsu@gmail.com

Датчики тока являются очень важным типом устройств. Существует большое количество датчиков тока, работающих на основе различных физических явлений. Наиболее распространенными являются такие датчики, как трансформатор тока, магниторезистивные и датчики Холла [1]. Несмотря на то, что магнитоэлектрические (МЭ) датчики тока имеют небольшие размер и вес, а также высокую чувствительность, в публикациях уделялось мало внимания их сравнению с МЭ датчиками магнитного поля [2]. Также на сегодняшний день отсутствуют МЭ датчики тока, готовые к практическому использованию.

Для улучшения выходных характеристик МЭ датчика тока, предлагается использовать в качестве чувствительного элемента композит на основе градиентной бидоменной структуры $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$. Известно [1], что использование градиентных структур в магнитоэлектрично-пьезоэлектрических композитах делает возможным использование градиента намагниченности для создания самомагничивающейся структуры путем замены внешнего магнитного поля на внутреннее, что может значительно уменьшить вес и габариты устройства. Ранее был рассмотрен датчик тока на основе магнитоэлектрично-пьезоэлектрического композита Metglas-PZT-Metglas [2] с использованием внешнего магнитного поля 15 Э. В случае использования в качестве чувствительного элемента датчика тока на основе градиентной бидоменной структуры $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$ со следующими расчетными толщинами слоев: ниобат лития - 0,5 мм, никель - 300 нм, Metglas - 29 мкм, отпадает необходимость во внешнем магнитном поле, и в результате снижения шума конструкции увеличивается чувствительность устройства. Дополнительным преимуществом датчиков тока на основе ниобата лития является отсутствие свинцового компонента в устройстве. Предварительные оценки показывают, что МЭ коэффициент в предлагаемой структуре равен $500 \text{ В}/(\text{см}\cdot\text{Э})$, эквивалентный уровень магнитного шума $120 \text{ пТ}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$ при 10 Гц и чувствительности $300 \text{ нВ}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$ при 10 Гц. Исследование показывает, что градиентные бидоменные структуры $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$ могут быть использованы в качестве элемента для создания высокочувствительных самомагничивающихся датчиков токов и магнитных полей.

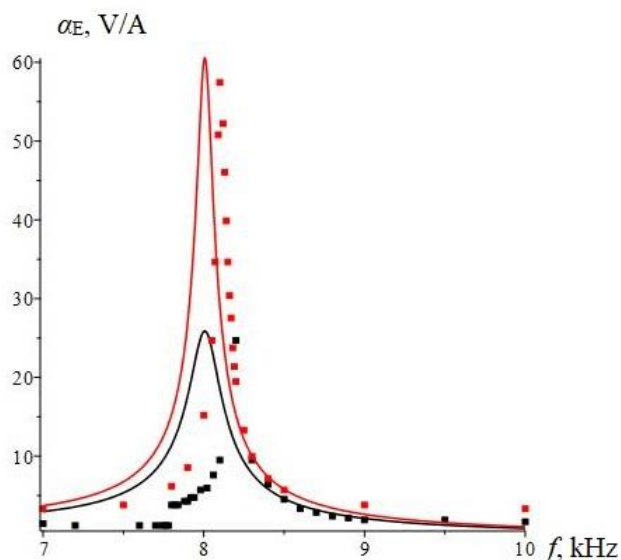


рис.1. Зависимость МЭ коэффициента по напряжению от частоты без поля подмагничивания. Сплошная линия – теоретическая зависимость, черные точки – экспериментальная зависимость структуры $\text{LiNbO}_3 / \text{Metglas}$, красные точки – экспериментальная зависимость градиентной структуры $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$.

Как видно из рис. 2, чувствительность достигает значения 0,41 В/А (без использования усилителя). Результаты показывают высокую практическую значимость для прикладных применений.

Использование этой градиентной бидоменной структуры позволит значительно снизить уровень магнитного шума, повысить чувствительность, а также уменьшить габаритные размеры устройства, поскольку нет необходимости использовать постоянный магнит и усилитель.

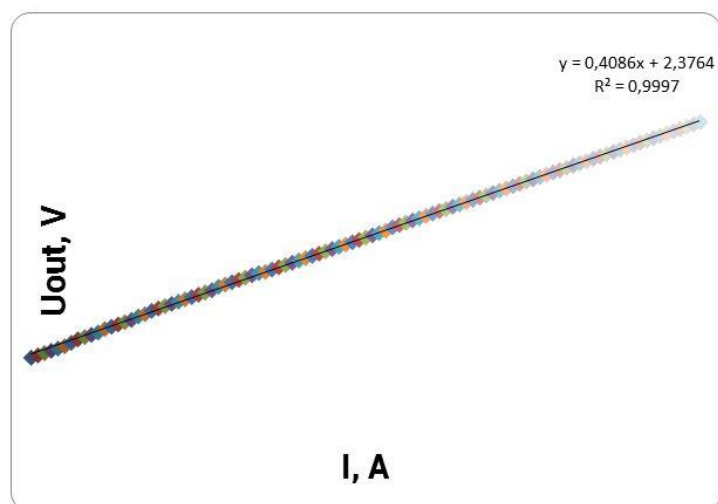


рис.2. Выходная зависимость МЭ датчика тока.

Значение МЭ коэффициента по напряжению для образца $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$ составляет $\alpha_{\text{ME}} = 57.4$ без поля смещения. Показано, что значение МЭ коэффициента по напряжению без поля смещения в образце $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$ значительно выше, чем в структуре $\text{LiNbO}_3 / \text{Metglas}$.

Полученные результаты открывают широкие возможности для практического применения градиентной бидоменной структуры $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$ в качестве чувствительного элемента для разработки высокочувствительных датчиков тока и магнитного поля.

Предлагаемый датчик тока может использоваться в измерительной технике, в электрических сетях и системах управления, системах безопасности; в металлоискателях; в автомобильной промышленности; на железнодорожном транспорте; в беспроводных системах учета; в космической технике и робототехнике; в медицине.

Преимуществами датчика тока на основе бидоменной градиентной структуры $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$ являются высокая чувствительность, низкое энергопотребление, большой диапазон выходного напряжения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-57-53001.

Список публикаций:

[1] *Modern Sensors Handbook* R.Pavel, T. Alois., Eds.; ISTE Ltd, 2007, 518p.

[2] M.I. Bichurin, V.M. Petrov, R.V. Petrov, A.S. Tatarenko. *Magnetolectric Composites*. Pan Stanford Publ., Singapore, 2019, 280p.

Магнитоэлектрический магнитокардиограф

Лобекин Вячеслав Николаевич

Козонов Александр Юрьевич

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

slavalobekin@gmail.com

В современном мире идет тенденция создания малогабаритных, портативных, мобильных устройств, работающих при комнатной температуре, которые позволят быстро и точно проводить измерения и диагностику необходимых данных. Одним из таких устройств является магнитоэлектрический (МЭ) магнитокардиометр, работающий на МЭ эффекте, способный детектировать магнитную составляющую человеческого сердца. В отличие от СКВИД магнитометров системы на МЭ эффекте позволяют детектировать малые магнитные поля при комнатной температуре и без специальных условий, необходимых для проведения измерений [1].

Первая магнитокардиограмма (МКГ) была записана Baule and McFee в 1963 г. [2]. Их способ измерения магнитного поля сердца человека осуществлялся с помощью пары медных индукционных катушек вокруг ферромагнитного сердечника при комнатной температуре в неэкранированном окружении. Биоманнитные

сигналы человеческого тела предоставляют много полезной информации о сердце. Сигналы МКГ возникают в результате протекания электрических токов в активных нервных клетках сердца. Сигнал сердца взрослого человека является самым большим из биологических магнитных сигналов с максимальной величиной около 25 пТл.

Для каждого источника биоманнитного сигнала можно определить необходимые пределы обнаруживаемой напряженности и частоты магнитного поля. Сегодня, для исследования таких низкочастотных биологических магнитных сигналов, используют СКВИД магнитометры, но они дорогостоящие, крупногабаритные и требуют низких температур. Разработка МЭ магнитокардиометра на основе высокочувствительного МЭ датчика магнитного поля, работающего при комнатной температуре, позволит решить проблемы СКВИД магнитометров, за счет таких преимуществ, как: низкая стоимость, широкий диапазон частот и простота в изготовлении. МЭ датчик магнитного поля на основе МЭ композитных структур, является основным элементом портативного, мобильного МЭ магнитокардиометра [3,4].

В качестве чувствительного элемента МЭ датчика предлагается использовать композитную структуру

(Рис.1), состоящую из магнитоэлектрического элемента, выполненного в форме пластины из пьезоэлектрика, например, AlN или LiNbO₃ и пластин магнитострикционного материала, например, Метгласа.

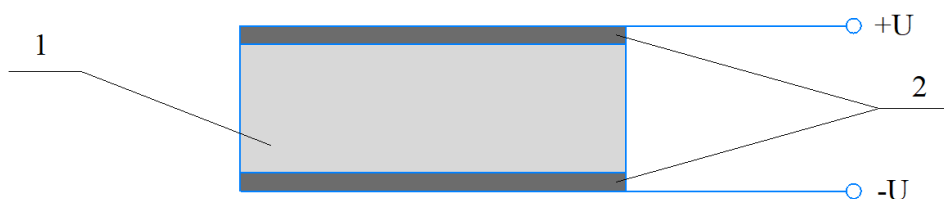


рис. 1 - Магнитоэлектрическая структура: 1 – пластина пьезоэлектрика AlN или LiNbO₃; 2 – пластины Метгласа.

На рис. 2 представлена структурная схема МЭ магнитокардиометра. Принцип работы такого МЭ магнитокардиометра заключается в следующем: полученный сигнал магнитной составляющей сердца детектируется МЭ датчиком, затем передается на малошумящий усилитель, например, AD745, AD7195, или ОРА627 и далее сигнал поступает в систему цифровой обработки сигнала, в которую входят фильтр низких частот, преобразователь АС/DC и АЦП и в дальнейшем, посредством беспроводной передачи, сигнал поступает на персональный компьютер с получением изображения в интерфейсе Lab View.

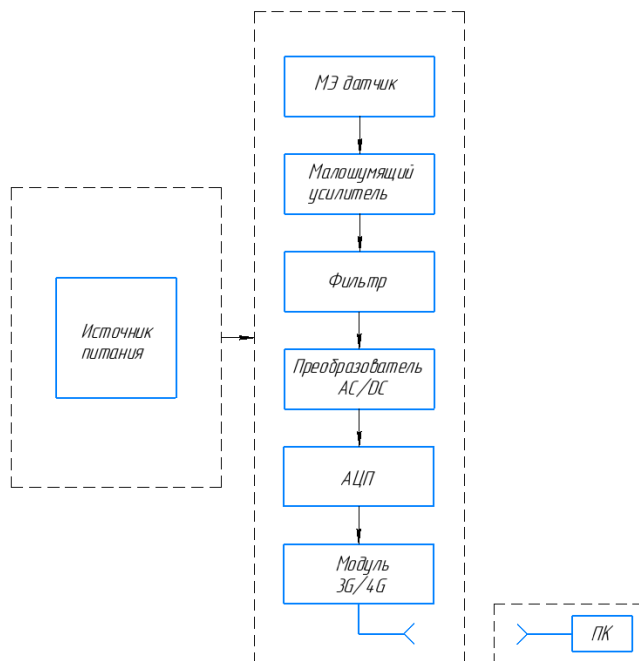


рис. 2 - Структурная схема магнитоэлектрического магнитокардиометра.

Разработка портативного, мобильного МЭ магнитокардиометра, работающего на МЭ эффекте, позволит перейти к абсолютно новому классу биомедицинских, измерительных, мобильных систем, решая проблемы существующих систем для измерения слабых магнитных полей человека, таких как, СКВИД магнитометры, а

именно крупные габариты, высокая стоимость, низкая рабочая температура, сложность изготовления. Разработанный портативный, мобильный МЭ магнитокардиометр будет обладать высокой чувствительностью порядка 5 пТл, работать при комнатной температуре и позволит детектировать магнитную составляющую человеческого сердца.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00391.

Список публикаций:

- [1] V.N. Lobekin, R.V. Petrov, M.I. Bichurin, A.V. Rebinok, R.A. Sulimanov, «Magnetolectric sensor for measuring weak magnetic biological fields», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 441 (2018), p. 9.
 [2] Baule G, Mcfee R. detection of the magnetic field of the heart. *Am Heart J*. 1963 Jul;66:95-6. doi: 10.1016/0002-8703(63)90075-9. PMID: 14045992.
 [3] Reermann, J.; Durdaut, P.; Salzer, S.; Demming, T.; Piorra, A.; Quandt, E.; Frey, N.; Höft, M.; Schmidt, G. Evaluation of magnetolectric sensor systems for cardiological applications. *Measurement* 2018, 116, 230–238.
 [4] Bichurin, M.; Petrov, R.; Sokolov, O.; Leontiev, V.; Kuts, V.; Kiselev, D.; Wang, Y. Magnetolectric Magnetic Field Sensors: A Review. *Sensors* 2021, 21, 6232. <https://doi.org/10.3390/s21186232>.

Моделирование сплит-кольцевого резонатора со структурой метаматериалов с ферритовым элементом

Лобекин Вячеслав Николаевич

Лаврова Ирина Германовна

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Татаренко Александр Сергеевич, к.т.н.

slavalobekin@gmail.com

В последнее время многие устройства и компоненты с улучшенными характеристиками были разработаны и исследованы на основе структур со свойствами метаматериалов. Основой таких устройств являются резонаторы, в частности, сплит-кольцевые резонаторы с узким зазором (SRR). Эти новые компоненты определены как устройства со свойствами метаматериалов. Преимущества этих резонаторов или элементов на их основе заключаются в их очень маленьком субволновом размере, что обеспечивает возможность создания компактной схемы и таких компонентов, как фильтры. Метаматериалы - это инженерные материалы, которые демонстрируют контролируемые электромагнитные характеристики, не встречающиеся в природе. Предмет метаматериалов привлек большое внимание к исследованиям от сверхвысоких до высоких терагерцевых и оптических частот, и многие устройства с новыми или улучшенными функциональными возможностями разработаны на основе концепции искусственного материала [1-3].

В данной работе рассматривается структура на основе сплит-кольцевого резонатора с добавлением ферритового элемента. Включение ферритового элемента позволяет осуществить электронную перестройку резонансных характеристик с помощью магнитного поля.

Для моделирования выбрана структура сплит-кольцевого резонатора со свойствами метаматериалов с ферритовым элементом ЖИГ, представленная на *рис. 1*. Конструкция выполнена на подложке Duroid 6010.2LM размерами 30x24 мм и толщиной 1,90 мм, с относительной диэлектрической проницаемостью 10,2 и тангенсом угла диэлектрических потерь 0,0023. Микрополосковая линия передачи является элементом возбуждения с волновым сопротивлением 50 Ом, сплит-кольцевой резонатор и заземление выполнено из меди с толщиной металлизации 0,035 мм [4]. В качестве ферритового элемента используется железо-иттриевый гранат.

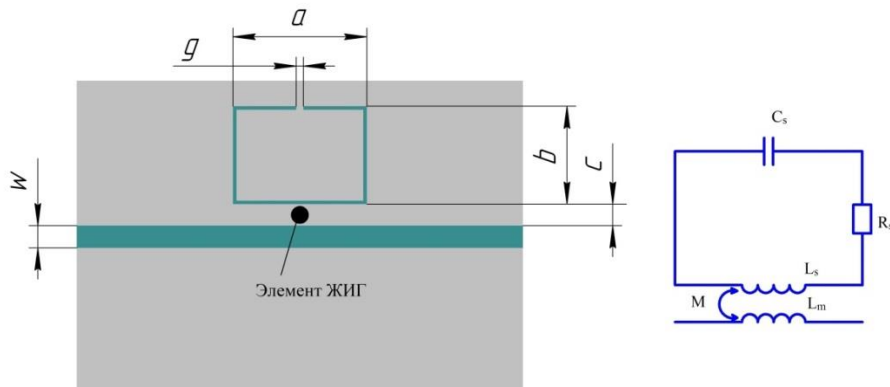


рис 1. – Структура сплит-кольцевого резонатора на основе метаматериалов с ферритовым элементом: $a=7$ мм, $b=7.5$ мм, $w=1.7$ мм, $c=0.65$ мм, $g=0.15$ мм.

Компьютерное моделирование проводилось в программе ANSYS HFSS, являющейся инструментом для трехмерного моделирования ВЧ/СВЧ электромагнитных полей. Технология HFSS позволяет выполнять расчет электрических и магнитных полей, токов, S параметров и излучений. Процесс выполнения расчета полностью автоматизирован, пользователю необходимо задать геометрические параметры, свойства материалов и расчетные характеристики. Основным расчетным параметром, получаемым при компьютерном моделировании, является параметр S_{21} , являющийся коэффициентом передачи. В результате моделирования получена амплитудно-частотная характеристика, представленная на рис. 2.

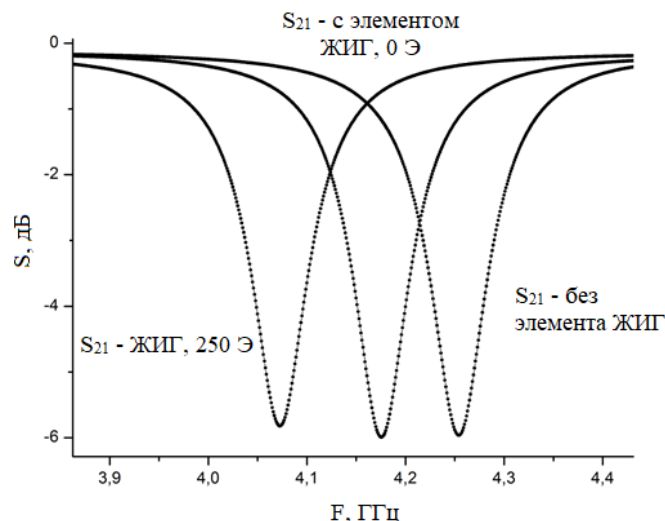


рис.2 – Амплитудно-частотная характеристика сплит-кольцевого резонатора на основе метаматериалов.

Полученные результаты моделирования показывают, что при добавлении ферритового элемента ЖИГ и приложении к нему магнитного поля, в структуру сплит-кольцевого резонатора, осуществляется электронная перестройка резонансной характеристики. При величине магнитного поля $H_0=250$ Э, сдвиг резонансной кривой составил 180 МГц относительно структуры без добавления элемента ЖИГ. На основе полученных результатов, можно сделать вывод, что использование метаматериалов и ферритовых элементов позволяет проектировать новые управляемые устройства с использованием метаматериалов и ферритовых элементов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00391.

Список публикаций:

- [1] S. Sunbeam Islam, M. R. Iqbal Faruque, M. Tariqul Islam, Md. Moinul Islam, and N. Misran "New NRI Metamaterial for Multi-band Operation," *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, vol. 8, 2016, pp. 171-173.
- [2] S. Sunbeam Islam, M. R. Iqbal Faruque, and M. Tariqul Islam, "A new direct retrieval method of refractive index for the metamaterial," *Current Science*, vol. 109, 2015, pp. 337-342.
- [3] W. Withayachumnankul, C. Fumeaux, and D. Abbott, "Compact electric-LC resonators for metamaterials," *Optics Express*, vol. 18, 2010, pp. 25912-25921.
- [4] W. Withayachumnankul, K. Jaruwongrungraseeb, A. Tuantranont, C. Fumeaux and D. Abbott, "Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization," *Sensors and Actuators*, vol. 189, 2013, pp. 233-237.

Структура и связанная динамика вихрей в спин-трансферном наноосцилляторе под воздействием спин-поляризованного тока и внешнего магнитного поля

Мухамадеева Виктория Владимировна

Степанов Станислав В., Антонов Георгий И., Левашова Ирина Андреевна, Саломасов Андрей Михайлович

Башкирский государственный университет

Екомасов Евгений Григорьевич, д.ф.-м.н.

mukhamadeeva.vika@mail.ru

В настоящее время одним из перспективных технических устройств для спинтроники, является микроволновой спин-трансферный наноосциллятор (СТНО) [1, 2]. В его основе обычно лежат мультислойные наностолбики, которые имеют два магнитных слоя различной толщины, разделенных немагнитной прослойкой (Рисунок 1) [2, 3]. В магнитных слоях может существовать, как основное состояние, магнитный вихрь. Появилось много работ, посвященных исследованию вихревых СТНО, когда вихрь существует в каждом из

магнитных слоев (см., например, [4, 5]). Показано, что для системы из двух взаимодействующих магнитостатически магнитных вихрей магнитных дисков, динамика вихрей может кардинально измениться по сравнению с одновихревым СТНО. Также экспериментально показана возможность раздельного переключения полярности каждого из вихрей при совместном приложении магнитного поля и спин-поляризованного тока.

Исследуемые в данной работе СТНО имеют магнитные слои из пермаллоя толщиной 4 нм и 15 нм разделенные немагнитной прослойкой меди толщиной 10 нм. С помощью численного решения обобщенного уравнения Ландау-Лифшица изучена динамика двух магнитостатически связанных магнитных вихрей под действием внешнего магнитного поля и спин-поляризованного электрического тока.

Рассмотрено влияние изменения толщины немагнитной прослойки на связанную динамику вихрей на примере СТНО малого диаметра (120 нм). В данной работе применяется увеличение немагнитного слоя с 10 нм до 15 нм, а также его уменьшение до 5 нм. Показано, что при увеличении толщины немагнитной прослойки наблюдается сдвиг величины критических токов в меньшую сторону, а диапазон токов, при котором наблюдается стационарный режим связанных колебаний вихрей, увеличивается. При достаточно малой толщине немагнитного слоя может меняться сценарий возможной динамики вихря в тонком слое: вихрь не покидает границы диска, а переключается по динамическому сценарию в пределах рассматриваемого малого радиуса.

Также исследован процесс переключения полярности магнитных вихрей при совместном воздействии спин-поляризованного тока и внешнего магнитного поля на СТНО большого (400 нм) диаметра. Построена диаграмма зависимости от величины спин-поляризованного тока величины магнитного поля, раздельно переключающего полярность вихря в магнитных слоях спин-трансферного наноосциллятора. Показано, что для раздельного переключения полярности вихрей в СТНО большого диаметра требуется использования меньшей величины магнитного поля по сравнению со случаями среднего и малого диаметров СТНО, что более выгодно с точки зрения практических приложений.

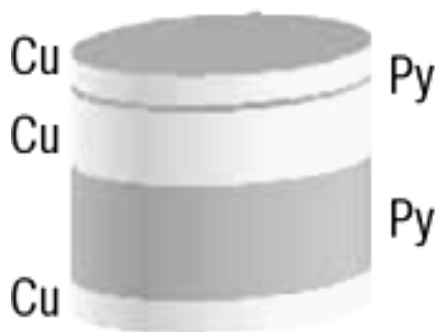


рис 1. Проводящий наностолбик с двумя слоями пермаллоя(Py), разделенные немагнитной прослойкой меди.

Список публикаций:

1. Guslienko K.Yu. // *Magnetic vortex state stability, reversal and dynamics in restricted geometries* // *J. Nanosc. Nanotechnol*, 2008 - v. 8, 2745-2760 (2008)
2. Звездин А.К., Звездин К.А., Хвальковский А.В. // *Обобщенное уравнение Ландау-Лифшица и процессы переноса спинового момента в магнитных наноструктурах. УФН*, 178, 436-442 (2008).
3. Екомасов А. Е., Степанов С. В., Звездин К. А., Екомасов Е. Г. // *Влияние перпендикулярного магнитного поля и поляризованного тока на динамику связанных магнитных вихрей в тонкой наностолбчатой проводящей трехслойной структуре - ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ*, 2017, том 118, № 4, с. 345–351.
4. Ekomasov A., Stepanov S., Zvezdin K., Ekomasov E. // *Spin current induced dynamics and polarity switching of coupled magnetic vortices in three-layer nanopillars* // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019. Vol. 471. P. 513–520.
5. Екомасов Е.Г., Степанов С.В., Звездин К.А., Пугач Н.Г., Антонов Г.И. // *Влияние спин-поляризованного тока на динамику и изменение структуры магнитных вихрей в трехслойном проводящем наноцилиндре большого диаметра / Физика металлов и металловедение – № 3 , т. 122. – 2021. – С. 212-220.*

Фрагментация падающих капель магнитной жидкости

Орехова Светлана Михайловна

Закинян Анастасия Александровна, Закинян Артур Робертович

Северо-Кавказский федеральный университет

Закинян Артур Робертович

lanafox189@mail.ru

Гидродинамические неустойчивости возникают во многих природных явлениях, а также в промышленных процессах. Широкий научный интерес представляют исследования эффектов неустойчивости в достаточно хорошо регулируемых условиях, которые могли бы дать представление об основных механизмах неустойчивости. В настоящей работе был рассмотрен один из наиболее простых видов неустойчивости – это фрагментация капли [1]. Дополнительные возможности в, подобного рода, исследованиях открываются благодаря применению намагничивающихся жидких сред.

Была проведена серия экспериментов для исследования фрагментации падающих капель ферромагнитной жидкости в жидкой немагнитной среде под воздействием магнитного поля. Однородное магнитное поле создавалось катушками Гельмгольца. Методика исследования заключалась в следующем. Вертикально установленную тонкую плоскую прозрачную ячейку (ячейка Хеле-Шоу) наполняли авиационным маслом или керосином. Затем при помощи шприца через верхнее отверстие в ячейке капали магнитную жидкость. После этого происходило включение источника тока, питающего катушки Гельмгольца. Изучался момент фрагментации капель, его зависимость от величины и направления магнитного поля. (рис. 1, 2).

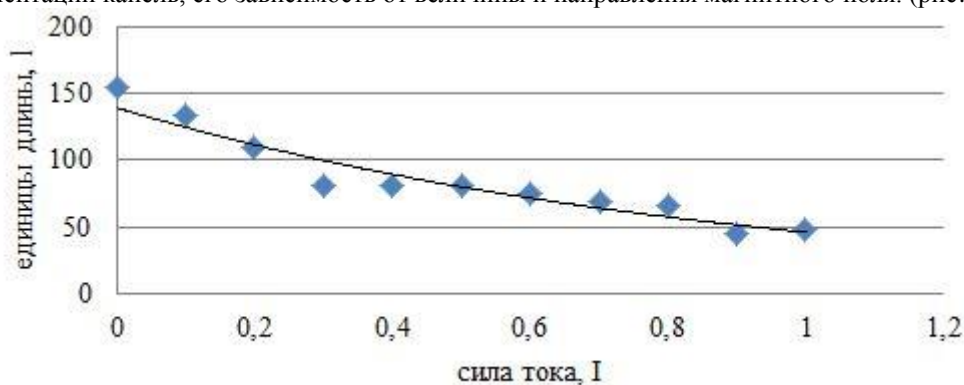


рис.1. Зависимость возникновения момента начала фрагментации капель ферромагнитной жидкости от силы тока, подаваемого на катушки. Среда – масло, поле – горизонтально направленное «от наблюдателя».

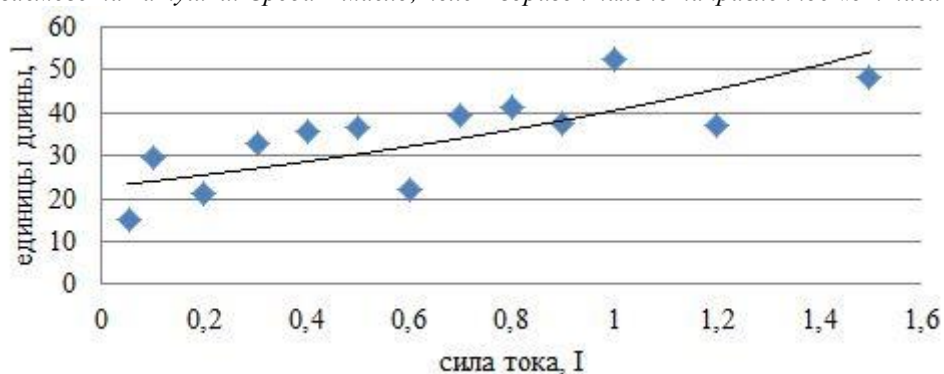


рис.2. Зависимость возникновения момента начала фрагментации капель ферромагнитной жидкости от силы тока, подаваемого на катушки. Среда – керосин, поле – горизонтально направленное «от наблюдателя».

Было выявлено, что при движении капли магнитной жидкости в керосине происходит больше последовательных фрагментаций капли, чем в авиационном масле. Это происходит из-за того, что основной используемой магнитной жидкости являлся додекан, который не имеет межфазного натяжения на границе с керосином, тогда как на границе с маслом действует межфазное натяжение. Были проведены измерения длины пути, который проходит капля до первого акта фрагментации. Оказалось, что, как в случае с керосином, так и с авиационным маслом, длина пути капли существенно зависит от магнитного поля. Так, при воздействии магнитного поля, направленного вдоль движения капли (вертикально), длина пути возрастает. Воздействие магнитного поля, перпендикулярного плоскости ячейки, приводит к сокращению длины пути капли до первого деления. Аналогичный эффект производит воздействие горизонтально направленного магнитного поля,

ориентированного вдоль плоскости ячейки. Таким образом, имеет место возможность управления закономерностями проявления неустойчивости и распада подающих капель магнитной жидкости при помощи магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке Северо-Кавказского центра математических исследований в рамках соглашения № 075-02-2021-1749 с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

Список публикаций:

[1] A. Garcimartin, H.L. Mancini and C. Perez-Garcia, *Europhys. Lett.*, 19 (1992) 171.

**Магнитоэлектрический резистор на основе
магнитоэлектрично – пьезополупроводниковой структуры
Metglas/GaAs/Metglas**

Петров Дмитрий Александрович

Козонов Александр Юрьевич

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

s182335@std.novsu.ru

Важнейшей задачей, стоящей сегодня перед электронной промышленностью страны, является разработка и внедрение новой отечественной высокочувствительной электронной компонентной базы и дальнейшее совершенствование радиоэлектронной аппаратуры в современных условиях. Решить эту задачу возможно за счет освоения в производстве новых приборов и устройств, относящихся к приборам магнитоэлектрической (МЭ) электроники в широком диапазоне частот. Появление подобных приборов и устройств обусловлено применением новых уникальных по своим свойствам материалов, структур и технологий их производства. Создание активных МЭ приборов, на основе разработанных физических принципах, будет способствовать развитию отечественной электроники. Систематический анализ доступных материалов в отечественной и зарубежной научно-технической литературе подтверждает, что на протяжении последних лет наблюдается постоянно возрастающий интерес к исследованию и разработке МЭ приборов в области низких частот и электромеханического резонанса. Однако, до последнего времени большинство исследований проводились исключительно с целью создания пассивных МЭ структур, приборов и устройств, таких как, МЭ датчики магнитного поля, датчики тока, гираторы и т.д. И только в последнее время стали появляться работы по исследованию пьезополупроводниковых материалов, которые могут быть взяты за основу при разработке активных МЭ приборов. Более того, в настоящее время, как в России, так и за рубежом, практически отсутствуют работы по разработке физических принципов создания активных низкочастотных приборов на основе МЭ эффекта.

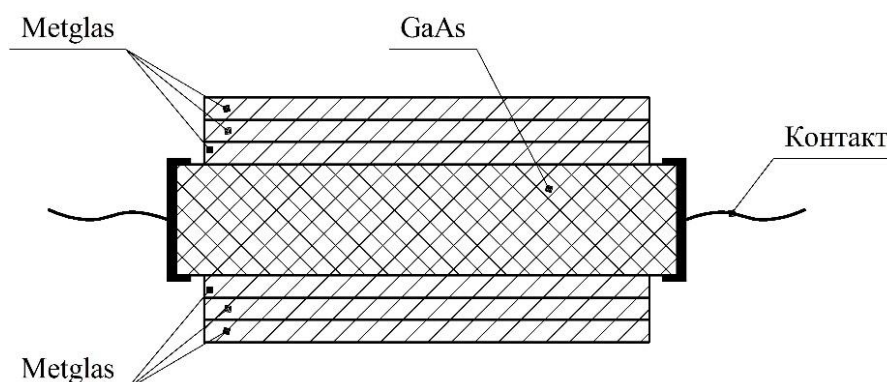


рис. 1 – Структура магнитоэлектрического резистора

На рис.1 предложен МЭ резистор, состоящий из магниторезистивного полупроводникового материала, работающий в области ЭМР, для управления сопротивлением резистора и двух омических контактов. В качестве магниторезистивного полупроводникового материала применена композиционная магнитоэлектрично – пьезополупроводниковая структура с градиентом намагниченности, образованная высокоомной подложкой арсенид галлия (GaAs) и магнитоэлектричным слоем, состоящим из метгласа (Metglas) и никеля (Ni).

Благодаря наличию в рассматриваемой структуре МЭ эффекта возможно резонансное увеличение магнитной чувствительности к магнитному полю в области электромеханического резонанса с использованием различных типов колебаний (продольной, поперечной, толщиной, изгибной, сдвиговой, крутильной мод). Предлагаемое решение позволяет получить повышение чувствительности резисторов к магнитному полю.

Таким образом, предлагаемая конструкция МЭ резистора позволяет повысить чувствительность датчиков магнитного поля, электрического тока, преобразователей, источников возобновляемой энергии, устройств медицинской техники и других устройств. На основе предложенной конструкции МЭ резистора появляется возможность создания активных МЭ полупроводниковых приборов и устройств.

Список публикаций:

[1] Д.А. Петров, В.С. Леонтьев, Г.А. Семенов, С.Н. Иванов, О.В. Соколов, А.Ю. Козонов, К.А. Сыроварова, К.В., Семенова, М.И. Бичурин Исследование магнитострикционно – пьезополупроводниковой структуры *Metglas/GaAs/Metglas* для практических применений, *IOP Conf. Series: Journal of Physics*, 2021.

[2] M.I. Bichurin, V.M. Petrov, V.S. Leontiev, S.N. Ivanov, O.V. Sokolov *Magnetolectric effect in layered structures of amorphous ferromagnetic alloy and gallium arsenide. JMMM* 424, p.115–117 (2017).

Магнитоэлектрический эффект в объемных мультиферроидных композиционных материалах

Ромазев Павел Евгеньевич

Луницкая Юлия Александровна

Челябинский государственный университет

Луницкая Юлия Александровна

paulcoolpaul174@gmail.com

В настоящее время особый интерес представляют исследования свойств материалов, обладающих свойствами мультиферроиков. В связи с этим большое внимание уделяется поиску материалов, сочетающих традиционные (магнитные, пьезоэлектрические, диэлектрические) и принципиально новые (гибридные) свойства.

В мультиферроидных композитах, содержащих пьезоэлектрические и ферромагнитные компоненты, магнитоэлектрический эффект возникает в результате комбинации магнитострикции и пьезоэффекта посредством механической связи между компонентами, а в случае применения переменных полей наблюдается резонансное усиление на частоте электромеханического резонанса [1]. В отличие от однофазных магнитоэлектрических материалов, - эффективность магнитоэлектрических взаимодействий в гетерогенных структурах (мультиферроидных композитах) можно повысить за счет подбора компонентов магнитных материалов с большим пьезомагнитным коэффициентом и высокой намагнитченностью насыщения, а также электрических материалов с высоким пьезомодулем и малыми диэлектрическими потерями.

Так, к числу хорошо изученных и широко применяемых на практике в качестве пьезоэлектрической компоненты в мультиферроиках относятся соединения на основе цирконата-титаната свинца, характеризующиеся высокими диэлектрическими и пьезоэлектрическими свойствами при комнатной температуре. В качестве магнитной компоненты в основном используют материалы семейства MeFe_2O_4 ($\text{Me} - \text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu}, \text{Zn}$) с высокими значениями магнитострикционных констант [2].

Одним из перспективных направлений практического использования композиционных феррит-пьезоэлектрических материалов является разработка необходимых в современной СВЧ- и микроэлектронной технике [3] функциональных устройств (датчиков магнитных полей, фазовращателей, модуляторов электромагнитных волн), способных работать в широком частотном диапазоне. Получить такие материалы возможно методом твердофазной реакции по типу статистической смеси в системе $(1-x)\text{PZT} + x\text{CF}$ в интервале мольного изменения $(0.1 \leq x \leq 0.5)$ исходных компонентов при спекании на воздухе. Совмещая магнитострикционные и пьезоэлектрические характеристики соединений, входящих в состав исследуемой системы, следует ожидать формирования композита с улучшенными электрофизическими свойствами.

В работе методом твердофазной реакции на воздухе синтезированы однофазные керамические композиционные феррит-пьезоэлектрические материалы с высокой степенью кристалличности и установлено, что совмещение пьезоэлектрической и ферромагнитной фаз в образцах композитной системы $(1-x)\text{PZT} + x\text{CF}$ $(0.0 \leq x \leq 0.5)$ приводит к появлению гибридных свойств (значения диэлектрической и магнитной проницаемостей) и эффектов (изменению величины комплексной диэлектрической проницаемости во внешнем магнитном поле). В исследованных композиционных материалах выявлен резонансный характер

магнитодиэлектрического эффекта, что обусловлено его максвелл-вагнеровским механизмом возникновения. При наложении постоянного магнитного поля (0.1 Тл) максимальная величина магнитоэлектрического коэффициента была достигнута в образце состава 0.8PZT-0.2CF, значение которой не превышало 0.7 мВ.

Список публикаций:

[1] Burdin D.A., Chashin D.V., Ekonomov N.A., Fetisov Y.K., Stashkevich A.A. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2016. Vol. 405. P. 244.

[2] Bayrakdar H., Yalcin O., Vural S., Esmer K. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2013. Vol. 343. P. 86.

[3] Fedii A.A., Kalganov D.A., Filonenko E.M., Yaroshenko F.A., Bezborodova P.A., Lupitskaya Yu.A. // *Физика твердого тела*. 2021. Т. 63(11). С. 1774.

Магнитоэлектрический тиристор

Семенова Ксения Витальевна

Сыроварова Кристина Андреевна

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

semenovaksu@icloud.com

Тиристор это полупроводниковый компонент, основная функция которого состоит в управлении электрическим током высокой мощности при получении маломощного управляющего сигнала. Эквивалентная схема тиристора представляет собой схему, состоящую из двух транзисторов. Таким образом, чувствительность к магнитному полю тиристора можно охарактеризовать чувствительностью к магнитному полю транзисторов. Впервые чувствительность тиристоры к магнитному полю была показана в работе [1].

В настоящее время полупроводниковые магниточувствительные тиристоры широко применяются в современной технике, например, в управляемых выпрямителях и переключателях. Магнитное поле электрически изолировано от магниточувствительных тиристоры – в этом и состоит уникальность таких приборов. Величина необходимого постоянного магнитного поля для работы магнитоэлектрического тиристора составляет единицы Тл, что является их основным недостатком. Устранение данного недостатка стало возможным появлению новых материалов и различным эффектам, например, магнитоэлектрического эффекта [2-3]. Разработка магнитоэлектрического тиристора позволит повысить чувствительность устройства и уменьшить величину необходимого постоянного магнитного поля за счет работы в режиме прямого магнитоэлектрического эффекта.

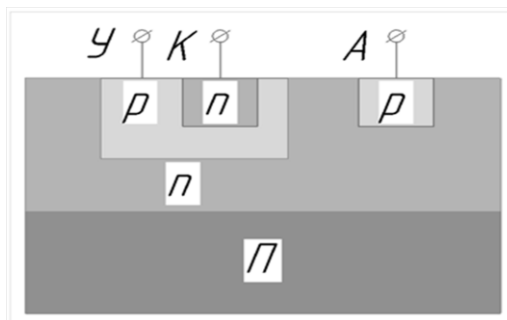


рис.1– Структура магнитоэлектрического тиристора: А – анод, К – катод, У – управляющий электрод, П – подложка;

Структура магнитоэлектрического тиристора аналогична типичной четырехслойной p-n-p-n структуре, состоящей из двух транзисторов: p-n-p и n-p-n. Магнитоэлектрический тиристор можно представить в виде тиристора, состоящего из подложки, анода, катода и управляющего электрода [4]. Материалом подложки может служить композиционная магнитоэлектрически-пьезополупроводниковая структура с градиентом намагниченности на основе высокоомной пьезополупроводниковой подложки - арсенида галлия (GaAs) и магнитоэлектрического слоя – Метгласа. Схема предлагаемого устройства показана на рисунке 1. Планируется продолжить исследование характеристик предложенного магнитоэлектрического тиристора.

Список публикаций:

[1] Стафеев В.И., Каракушан Э.И. *Магнитодиоды*. - М.: Наука, 1975. - 216 с

[2] M.I. Bichurin, V.M. Petrov, and G. Srinivasan. Modeling of magnetoelectric effect in ferromagnetic/piezoelectric multilayer composites // *Ferroelectrics*, vol. 280, pp. 165–175, 2002

[3] *Magnetoelectricity in Composites* // Eds. M. Bichurin and D. Viehland / Pan Stanford Publishing, Singapore 2011. – 286 p

[4] Викулин И.М. *Магниточувствительные полупроводниковые сенсоры: В43 монография* / Викулин И.М., Викулина Л.Ф., Горбачев В.Э. – Одесса, 2016. – 144 с

Магнитоэлектрический транзистор

Сыроварова Кристина Андреевна

Семенова Ксения Витальевна

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

crstnaa@icloud.com

Среди известных полупроводниковых преобразователей магнитного поля выделяют магниточувствительные транзисторы, параметры которых оптимизированы для получения чувствительности тока, протекающего через транзистор к магнитному полю [1].

Недостатками известных магнитных транзисторов являются низкая магниточувствительность и необходимость больших магнитных полей подмагничивания (единицы Тл).

Для увеличения магнитной чувствительности транзистора предлагается использовать слоистую композиционную магнитоотрицательно-пьезополупроводниковую структуру, позволяющую снизить требования по подмагничивающему полю при работе в режиме прямого магнитоэлектрического (МЭ) эффекта.

Предлагаемая структура магнитоэлектрического (МЭ) транзистора использует в качестве основы полевой транзистор. МЭ полевой транзистор представляет собой транзистор, состоящий из подложки, области проводящего канала, истока, стока и затвора. В качестве подложки предлагается использовать двухслойную композиционную магнитоотрицательно-пьезополупроводниковую структуру на основе высокоомной пьезополупроводниковой пластины (например, арсенид галлия (GaAs)) и магнитоотрицательного слоя (например, Метглас или никель) [2].

В качестве материала проводящего канала, по аналогии с [3], предлагается использовать слой полупроводникового материала GaAs, в котором возможно управление током с помощью магнитного поля, воздействующего на магнитный слой, в режиме прямого МЭ эффекта.

На рисунке 1 представлена схема устройства.

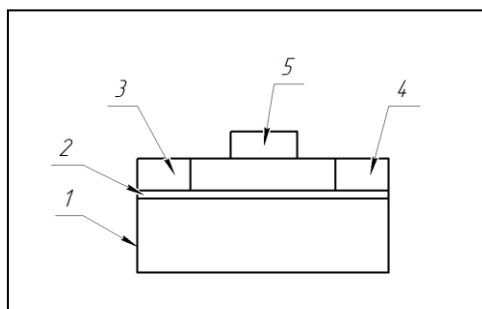


рис.1. Схема магнитоэлектрического полевого транзистора: 1 – композиционная магнитоотрицательно-пьезополупроводниковая структура; 2 – область проводящего канала; 3 – исток; 4 – сток; 5 – затвор

Так как работа данного прибора основана на применении магнитоотрицательно-пьезополупроводниковой структуры, возможно увеличение магнитной чувствительности к магнитному полю в режиме прямого МЭ эффекта.

Список публикаций:

[1] Бараночников М. Л. // Микромагнитоэлектроника. Т. 1. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 544 с.: ил.

[2] Бичурин М. И., Петров В. М., Филиппов Д. А., Сринивасан Г. // Магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2005. – 226 с

[3] I. Stolichnov et al, Nature Mater. 7, 464 (2008)

Процессы перемагничивания магнитоодноосных плёнок с колумнарным дефектом в перпендикулярном и плоскостном полях

Филлипов Михаил Александрович

Вахитов Роберт Миннисламович, Ахметова Айгуль Альфредовна, Солонецкий Ростислав Владимирович

Башкирский государственный университет

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

mikhail.filippov.99@mail.ru

В последнее время активно изучается определённый тип магнитных материалов, в которых возможно существование магнитных скирмионов. Магнитные скирмионы—это вихреподобные магнитные неоднородности, несущие топологический заряд, которые впервые были обнаружены в киральных магнетиках [1]. Устойчивость скирмионных состояний в них обеспечивается объёмным взаимодействием Дзялошинского-Мория (DMI), которое проявляется в основном только при низких температурах. В случае же ультратонких многослойных плёнок, в которых реализуется межфазное DMI, магнитные скирмионы наблюдаются уже при комнатных температурах, но и здесь присутствуют проблемы с их стабильностью. При этом было выяснено, что магнитные скирмионы обладают рядом уникальных свойств: топологическая защищённость, возможность управления ими с помощью электрических токов малой плотности, малые размеры и другие. Исходя из этого, скирмионы весьма перспективны для использования в устройствах магнитной памяти нового поколения. Поэтому актуальным становится вопрос их стабилизации другими методами, без учёта DMI. Один из возможных способов как раз представлен в этой работе - образование стабильного скирмиона на колумнарном дефекте типа “потенциальная яма” в одноосной ферромагнитной плёнке. Чтобы использовать скирмионы в качестве носителей информации в запоминающих устройствах необходимо научиться управлять ими. В частности, это можно сделать с помощью магнитных полей. В связи со сказанным представляется интерес изучения процессов перемагничивания скирмионов в плоскостном и перпендикулярном магнитных полях.

В работе [2] уже был проведён теоретический анализ микромагнитных структур, которые возникают в магнитных плёнках с модулированной одноосной анизотропией, а также их сценарии перемагничивания. Исследования показали, что они бывают четырёх типов, два из которых представляют собой нетопологический солитон, а два — магнитный скирмион. Они различаются между собой ориентацией кора и направлением намагниченности на границе диска. Однако они имеют и общие топологические особенности; в их структуре можно выделить три участка вращения магнитных моментов: кор, промежуточный и граничный участки.

Наложение перпендикулярного магнитного поля \mathbf{H} приводит к трансформации структуры магнитных неоднородностей, в частности, магнитный солитон с ориентацией кора, противоположной полю \mathbf{H} , перемагничивается в три этапа: вначале уменьшаются размеры кора, затем при его критическом значении H_c переключается ориентация кора и скирмион превращается в нетопологический солитон. Последний с увеличением \mathbf{H} уменьшается в размерах, он как бы “испаряется” [2] и исчезает.

При действии же плоскостного магнитного поля на плёнку, перемагничивание сопровождается возникновением асимметрии распределения магнитных моментов в скирмионе: часть области промежуточного участка, в которой киральность спинов совпадает с направлением \mathbf{H} , расширяется за счёт уменьшения размеров области, в которой киральность спинов противоположна полю. При этом происходит сдвиг скирмиона в сторону уменьшающейся области. При критическом значении поля H_c скирмион скачком перемагничивается по направлению поля.

С помощью микромагнитного моделирования удалось подтвердить данные сценарии перемагничивания. Моделирование было осуществлено с помощью пакета программ открытого доступа OOMMF. Данный пакет основан на численном решении уравнения Ландау-Лифшица, которое описывает распределение намагниченности в магнетике с учётом размагничивающих полей. Решение производится методом конечных разностей. Устойчивое состояние скирмиона в отсутствии поля было обнаружено при следующих параметрах: диаметр диска 600 нм, толщина диска 30 нм, диаметр дефекта 60 нм, $K_{u1}=3 \times 10^4$ Дж/м³ (вне дефекта), $K_{u2}=-0.5 \times 10^4$ Дж/м³ (на дефекте), $M_s=2 \times 10^5$ А/м, $A=2.5 \times 10^{-13}$ Дж/м, фактор качества $Q=1.19$ [3]. Размеры ячейки разбиения брались как $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ нм (рис.1). Радиус обнаруженного скирмиона, рассчитанный на основе полученных данных распределения намагниченности в радиальном направлении диаметра диска, составляет 33.54 нм.

Для обоих сценариев перемагничивания были определены критические значения магнитных полей. При приложении перпендикулярного поля критическое значение “переключения” кора $H_c=123$ мТл, при превышении значения поля $H=254$ мТл образец становится однородно намагниченным. При воздействии плоскостного поля при его критическом значении $H_c=19.4$ мТл кор полностью вытесняется с дефекта и область дефекта становится полностью перемагниченной вдоль поля \mathbf{H} .

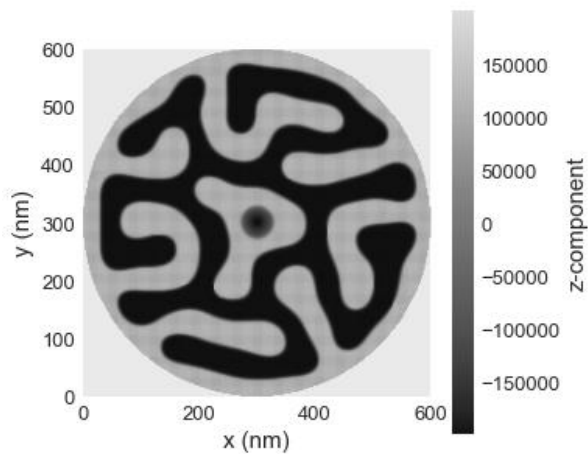


рис.1. Начальное равновесное состояние диска

Список публикаций:

- [1] K.Everschor-Sitte, J.Masell, R.M.Reeve, M.Kläui, *Perspective: Magnetic skyrmions* // *J. Appl. Phys.* 2018. 124. 240901.
- [2] R.M.Vakhitov, R.V.Solonetsky, A.A.Akhmetova // *J. Appl. Phys.* 2020. 128. 153904.
- [3] M.V.Sapozhnikov, S.N.Vdovichev, O.L.Ermolaeva, N.S.Gusev, A.A.Fraerman, S.A.Gusev, Yu.V.Petrov // *Appl. Phys. Lett.* 2016. 109. 042406.