Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Куц Виктор Викторович

ГРАДИЕНТНЫЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ БИДОМЕННЫХ КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ

Специальность:
1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
к.ф.-м.н., с.н.с.,
Турутин А.В.

Москва, 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Магнитоэлектрические (МЭ) материалы за счет одновременного наличия ферромагнитного (ФМ) упорядочения и пьезоэлектрического (ПЭ) эффекта способны преобразовывать воздействие внешнего магнитного поля (МП) в электрический сигнал (прямой МЭ эффект) и изменять намагниченность под воздействием внешнего электрического поля (ЭП) (обратный МЭ эффект) [1]. Первое экспериментальное подтверждение существования МЭ эффекта продемонстрировано на однофазном оксиде хрома (III) в работах Радо и Астрова [2, 3]. Однако малые величины МЭ эффекта в однофазных материалах лимитируют возможность их использования для практических применений.

В современной литературе большой интерес научного сообщества обращен к композитным мультиферроикам, в которых вышеуказанные упорядочения сосуществуют в отдельных, но механически связанных между собой, пьезоэлектрических (ПЭ) и магнитострикционных (МС) фазах. Вариативность выбора компонентов в МЭ композитах с большими значениями ПЭ и МС коэффициентов дает возможность получения бóльших значений МЭ эффекта в сравнении с однофазными МЭ материалами. На сегодняшний день продемонстрировано успешное применение МЭ композитов в широком спектре устройств: электронно-настраиваемый СВЧ-фильтр [4], МЭ энергонезависимая память [5–7], гиратор [8], тахометр [9], датчик тока [10], преобразователь энергии [11] и др. Высокий интерес к этим материалам подтверждается внушительным количеством статей-обзоров по данной тематике [12–18].

Наиболее перспективным направлением развития тематики композитных мультиферроиков являются сенсорные элементы для датчиков МП [19, 20]. Возможность детектирования МЭ структурами МП величинами вплоть до 200 фТл [21] делает их возможной альтернативой в сравнении с другими

датчиками МП по соотношению себестоимости и чувствительности к МП (такими как SQUID-магнитометр [22], магнитометр на оптической накачке [23], магниторезистивный датчик МП [24] и датчик Холла [25]). Более того, потенциал миниатюризации МЭ структур до микронных размеров может быть реализован для их внедрения в микроэлектромеханические системы (МЭМС) [26, 27].

Для корректной работы МЭ композита требуется вывод в «рабочую точку» за счет приложения внешнего постоянного МП, что реализуется за счет добавления постоянных магнитов, соленоидов либо катушек Гельмгольца, что приводит к увеличению линейных размеров, появлению дополнительных источников магнитного шума и, следовательно, ухудшению характеристик датчика. Одним из реализуемых решений является использование градиентных МЭ структур с дополнительным подмагничивающим слоем [28].

Большинство исследований, связанных с композитными мультиферроиками, выполнены в специальных лабораторных условиях, подразумевающие использование однородных МП (ОМП). В то же время в практических применениях обычно детектируются неоднородные МП (НМП), в случае которого при проведении измерений с помощью МЭ структур необходимо учитывать дополнительные параметры (распределение внешнего МП по объему МС компонента, тип источника НМП, расположение МЭ датчика относительно источника НМП). Взаимодействие МЭ композитов с НМП остается актуальной тематикой для исследования [29–34].

Исследования выполнялись на базе НИТУ МИСИС в рамках НИР, поддержанных по следующим проектам:

- грант УМНИК Фонда содействия инновациям № 11815ГУ/2023 «Разработка магнитоэлектрического композитного датчика неоднородных магнитных полей для использования в приборах медицинского назначения и полупроводниковой промышленности» (2022-2024 гг.);

• Государственное задание проект № 0718-2020-0031 «Новые магнитоэлектрические композитные материалы на основе оксидных сегнетоэлектриков с упорядоченной доменной структурой: получение и свойства» (2021-2023 гг.);

• Государственное задание проект № FSME-2024-0001 «Бессвинцовые сегнетоэлектрики и магнитоэлектрические материалы для перспективных сенсоров, актюаторов и элементов электроники» (2024-2026 гг.);

• грант РНФ проект № 22-19-00808 «Градиентные композитные магнитоэлектрические материалы для сверхчувствительных датчиков неоднородных магнитных полей» (2022-2024 гг.).

Цель работы:

Исследование градиентных магнитоэлектрических композитных структур на основе бидоменных кристаллов $LiNbO_3$ и слоев Ni/Metglas с ненулевым МЭ откликом в отсутствие внешнего постоянного МП.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработать и сконструировать экспериментальные установки для получения никельсодержащих подмагничивающих слоев методом электрохимического осаждения, проведения термической обработки в постоянном МП и исследования МЭ характеристик градиентных композитных структур.
2. Получить градиентные МЭ структуры «бидоменный кристалл $LiNbO_3$ / Ni / Metglas» и исследовать влияние параметров подмагничивающего слоя на их МЭ отклик.
3. Предложить теоретическое описание поля смещения с учетом магнитостатического и магнитоупругого вкладов в градиентной МЭ структуре «бидоменный кристалл $LiNbO_3$ / Ni / Metglas».

4. Провести моделирование и экспериментальное исследование отклика градиентных МЭ структур на НМП, формируемые различными модельными источниками, включая одиночный проводник, соленоид и систему взаимно перпендикулярных проводников.

5. Разработать методику регистрации и картирования НМП с использованием градиентной МЭ структуры «бидоменный кристалл $LiNbO_3$ / Ni / Metglas».

6. Оценить возможность детектирования магнитного сигнала, имитирующего форму протекающих импульсов в сердце живых организмов, при помощи градиентной МЭ структуры.

Объекты и методы исследования:

Объектами исследования являлись градиентные МЭ структуры «бидоменный кристалл $LiNbO_3$ / Ni / Metglas 2826MB», содержащие подмагничивающий слой Ni и МС слой Metglas. Слои Ni получали методом электрохимического осаждения и подвергали термической обработке в постоянном МП. Характеристики полученных слоев Ni исследовали методами профилометрии, рентгеноструктурным анализом и магнито-силовой микроскопией.

МЭ отклик структур исследовали в однородных и неоднородных МП в зависимости от внешнего постоянного МП и частоты переменного МП. НМП создавали с использованием одиночного проводника, соленоида и системы взаимноперпендикулярных проводников. Электрический отклик структур регистрировали методом синхронного детектирования. Для интерпретации экспериментальных результатов применяли теоретическое моделирование магнитного взаимодействия подмагничивающего и МС слоев.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Поле самоподмагничивания градиентной магнитоэлектрической структуры «бидоменный кристалл $LiNbO_3$ / Ni / Metglas» определяется суперпозицией магнитостатического поля остаточно намагниченного слоя Ni и магнитоупругого поля, обусловленного механическим взаимодействием слоев Ni и Metglas; для данной структуры магнитоупругий вклад направлен противоположно магнитостатическому и частично компенсирует его.
2. Величина поля смещения квазистатической магнитоэлектрической зависимости структуры «бидоменный кристалл $LiNbO_3$ / Ni / Metglas» определяется толщиной подмагничивающего слоя Ni; при толщине Ni 9 мкм и Metglas 29 мкм рабочая точка структуры смещается к началу линейного участка полевой зависимости без приложения внешнего постоянного магнитного поля.
3. Внутреннее магнитное поле подмагничивающего слоя Ni в градиентной структуре «бидоменный кристалл $LiNbO_3$ / Ni / Metglas» смещает квазистатическую зависимость магнитоэлектрического отклика таким образом, что при отсутствии внешнего постоянного магнитного поля реализуется линейное преобразование магнитного поля, создаваемого постоянным током. Для структуры $LiNbO_3$(500 мкм) / Ni(10 мкм) / Metglas 2826MB (29 мкм) коэффициент преобразования составляет 0,9 В/А, а линейность в диапазоне токов до 10 А – 99,8 %.
4. При картировании неоднородного магнитного поля градиентной магнитоэлектрической структурой-кантилевером наблюдается пространственное смещение координаты максимума МЭ сигнала относительно координаты максимальной величины интегральной магнитной индукции поля источника.

Научная новизна работы:

1. Предложена самосогласованная модель поля смещения в градиентной структуре «бидоменный кристалл $LiNbO_3$ / Ni / Metglas», в которой результирующее внутреннее поле представлено в виде суммы магнитостатического вклада остаточной намагниченности Ni и магнитоупругого вклада, обусловленного несовпадением магнитострикционных деформаций Ni и Metglas. Для рассмотренного набора параметров количественно разделены вклады −4,67 Э и +1,39 Э и получено результирующее поле −3,28 Э.
2. Экспериментально установлена связь между толщиной подмагничивающего слоя Ni в диапазоне 2–10 мкм и смещением квазистатической МЭ зависимости; определена толщина Ni около 9 мкм, при которой рабочая точка структуры достигает начала линейного участка без дополнительного МП.
3. Установлены особенности пространственного отклика самоподмагниченной градиентной структуры на НМП различной геометрии. Для поля одиночного провода выявлено систематическое смещение координаты максимального отклика на 2–5 мм, воспроизводимое моделью с расчетным смещением около 6 мм; показана необходимость учета данного эффекта при интерпретации и картировании НМП.
4. Разработан и экспериментально апробирован способ двумерного картирования НМП градиентной структурой «бидоменный кристалл $LiNbO_3$ / Ni / Metglas» для источников различной конфигурации (одиночный провод, соленоид, два взаимно перпендикулярных провода).
5. Показана возможность восстановления временной формы импульсного неоднородного магнитного сигнала путем учета измеренной частотной чувствительности магнитоэлектрической структуры и последующего обратного преобразования Фурье, что позволяет выделять положения R-подобных пиков, имитирующих магнитные проявления сердечной активности во входной форме сигнала.

Практическое значение полученных результатов:

Практическая значимость работы заключается в разработке МЭ сенсорных структур «бидоменный кристалл $LiNbO_3$ / Ni / Metglas», обеспечивающих регистрацию магнитных полей без приложения внешнего постоянного магнитного поля. Использование внутреннего подмагничивающего слоя Ni позволяет упростить конструкцию сенсорного элемента и уменьшить электропотребления, и размеры устройств на их основе.

Разработанная модель магнитного взаимодействия подмагничивающего и магнитострикционного слоев может быть использована для выбора параметров градиентных магнитоэлектрических структур, обеспечивающих необходимое смещение полевой зависимости и повышение отклика в заданных условиях эксплуатации.

Предложенная методика регистрации и картирования неоднородных магнитных полей может быть использована при создании компактных средств магнитной диагностики и контроля локальных распределений магнитного поля; разработанный способ защищен патентом РФ RU 2841489 C1. Экспериментально показана возможность регистрации импульсных магнитных сигналов, имитирующих магнитные проявления сердечной активности, что определяет перспективность их дальнейшего применения в биомагнитных сенсорных системах.

Личный вклад автора:

Личный вклад автора в работу состоит в разработке экспериментальной установки по измерению МЭ эффекта, системы для проведения электрохимического осаждения никельсодержащих слоев, системы для проведения отжигов в постоянном ОМП. Автором описаны теоретическая модель и численное моделирование поля смещения в градиентной структуре «бидоменный кристалл $LiNbO_3$ / Ni / Metglas» с программным расчетом параметра N_{12}. Отработаны технологические режимы на каждом этапе подготовки градиентных МЭ структур. Проведены все экспериментальные работы и дальнейший анализ полученных данных. Автор внес основной вклад в написании статей и патента по обработанным результатам исследований. Экспериментальные результаты получены на кафедре Материаловедения Полупроводников и Диэлектриков НИТУ МИСИС.

Апробация работы:

Результаты исследований были представлены в виде докладов на следующих конференциях:

1. Куц В.В., Турутин А.В., Кубасов И.В., и др. «Магнитоэлектрический датчик тока на основе градиентной структуры бидоменный $LiNbO_3$ (LN)/Ni/Metglas». Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2021", 2021, Москва, Россия, 12/04/2021 – 23/04/2021. Устный доклад.
2. Куц В.В. «Магнитоэлектрический датчик тока на основе градиентной структуры». 76-е Дни науки НИТУ МИСИС, 2021, Москва, Россия, 01/04/2021-16/04/2021. Устный доклад.
3. Kuts V.V., Turutin A.V., Kubasov I.V. et al. «Gradient Magnetoelectric Current Sensor». International Conference «Functional Materials» ICFM-2021, 2021, Alushta, Crimea, 04/10/2021 – 08/10/2021. Устный доклад.

4. Kuts V.V., Turutin A.V., Skryleva E.A. et al. «MEMS magnetoelectric composite structure for low-magnetic field sensing». X International Scientific Conference «Actual problems of solid state physics», 2023, Minsk, Belarus, 22/05/23 – 26/05/23. Устный доклад.

5. Куц В.В., Турутин А.В., Кубасов И.В. и др. «Влияние направления намагниченности на магнитоэлектирческие свойства структуры «бидоменный $LiNbO_3/Fe_{77}Co_4Si_8B_{11}$». XXV Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах», 2024, Москва, Россия, 01/07/24 – 06/07/24. Устный доклад.

6. Kuts V.V., Turutin A.V., Kubasov I.V. et al. «Magnetoelectric Composite Materials from Bulk to MEMS». VI International Baltic Conference on Magnetism, 2025, Kaliningrad, Russia, 17/08/25 – 21/08/25. Устный доклад.

По теме диссертации опубликовано 4 статьи и 1 патент.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, списка сокращений, списка используемых источников из 73 наименований и трех приложений, изложена на 121 странице, включая 48 рисунков и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **ВВЕДЕНИИ** представлены поставленные цель и задачи, актуальность тематики градиентных МЭ структур, объекты и методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, практическое значение полученных результатов, личный вклад автора, аппробация, структура и объем работы.

В **Главе 1** проведен аналитический обзор литературы по тематике градиентных МЭ композитных структур. Рассмотрены основные механизмы образования ненулевого МЭ отклика в композитных структурах: обменное взаимодействие ФМ-антиферромагнитного (АФМ) слоев, внесение механических напряжений, гистерезис МС эффекта магнитного слоя, модуляция внешим постоянным ЭП и взаимодействие двух магнитных слоев. Основываясь на сравнении величин ненулевых МЭ коэффициентов для структур с разными механизмами образования ненулевого МЭ отклика, для реализации градиентной МЭ структуры выбран механизм взаимодействия лвух магнитных слоев. В качестве магнитомягкого материала выбран Metglas, а в качестве намагничивающего – Ni.

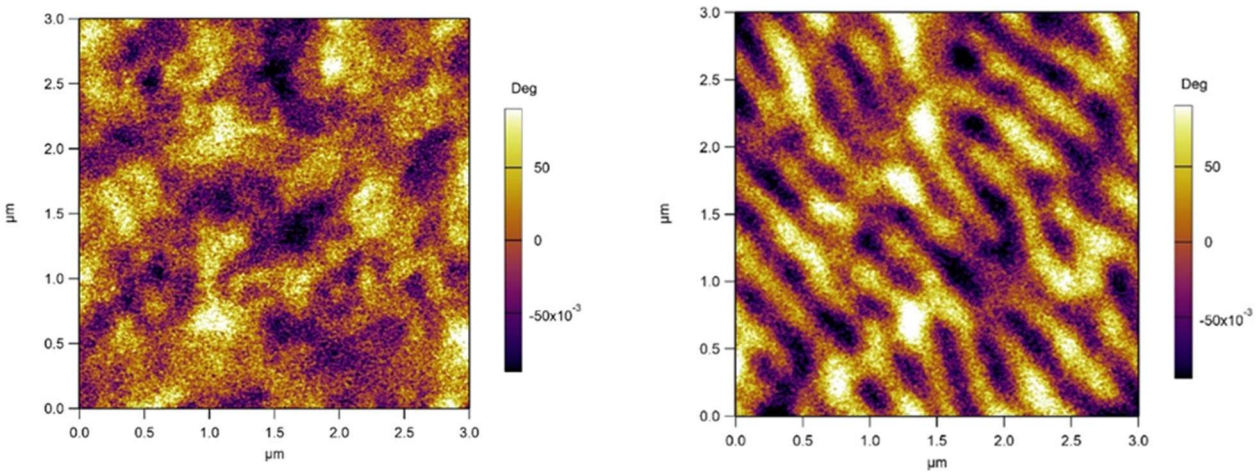
В **Главе 2** рассмотрена реализация экспериментальной установки для определения МЭ характеристик композитных структур. Проведен теоретический расчет распределения магнитной индукции МП, генерируемого катушками Гельмгольца. В полученной теоретической модели диаметр цилиндра, в котором создаваемое катушками Гельмгольца МП однородно, составляет 80 мм, а высота – 100 мм. Коэффициент взаимосвязи напряженности МП и подаваемого тока внутри объема однородности составил 7,0786 Э/А. Для решения проблемы с согласованием импедансов высокоомной МЭ структуры и входного сопротивления синхронного детектора создана измерительная плата на основе операционного усилителя TL071CP с каркасом для экранировая от внешних наводок. Для автоматизация

процесса измерений разработана управляющая программа в среде программирования NI LabView.

В **Главе 3** представлена теоретическая поля смещения с учетом магнитостатического и магнитоупругого вкладов в градиентной МЭ структуре на основе «бидоменный кристалл $LiNbO_3$ / Ni / Metglas». Для получения никельсодержащих слоев на бидоменных кристаллах $LiNbO_3$ собрана экспериментальная установка электрохимического осаждения со средней скоростью осаждения приблизительно 0,3 мкм/мин. С помощью рентгеновской дифрактометрии показано, что полученные никелевые слои имеют поликристаллическую текстурированную структуру, при этом вдоль длины исследованного образца преимущественно ориентируются плоскости (100) зерен никеля. Для упорядочения магнитной доменной структуры в полученных слоях никеля в направлении длин образцов сделана экспериментальная установка для проведения термической обработки в постоянном МП. Для подтверждения упорядочения магнитной доменной структуры поверхность никелевых слоев исследована методом МСМ. Полученные распределения для поверхностей никелевых слоев до и после термической обработки в постоянном МП представлены на рисунке 1 (а,б). В случае образцов до отжига распределение не имеет определенного упорядочения магнитных доменов, в то время как в случае никелевых слоев после отжига появляется выраженное направление упорядочения вдоль диагонали исследуемого участка, которое соответствует длине подготавливаемых МЭ структур.

На основе полученных МЭ структур был создан прототип датчика тока в проводе. Для выборки наиболее подходящей МЭ структуры в качестве чувствительного элемента МЭ датчика тока были получены квазистатические зависимости на резонансных частотах для образцов с толщинами никелевых слоев

2 мкм, 3 мкм, 4 мкм, 5 мкм, 7 мкм и 10 мкм и их теоретические представления, представленных на рисунке 2 (а).

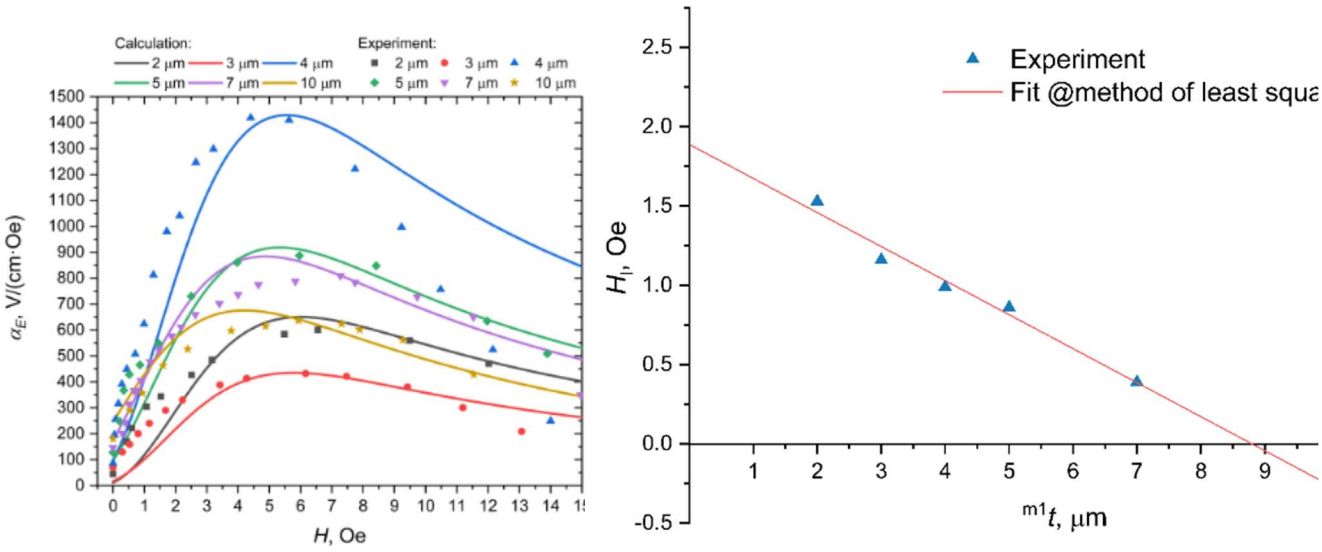


(а) (б)

а – до отжига в ПМП, б – после отжига в ПМП

Рисунок 1 – Магнитное распределение на поверхности никелевых слоев

Для определения нужной толщины подмагничивающего слоя для желаемого смещения была построена зависимость величины внешнего постоянного МП, необходимого для вывода МЭ структуры в начало линейного участка, от толщины никелевых слоев для данных образцов (рисунок 2 (б)). После линейной аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов толщина слоя никеля, при которой отсутствует необходимость в дополнительном подмагничивании МЭ структуры, составила ≈9 мкм. В качестве чувствительного элемента МЭ датчика тока выбрана МЭ структура с толщиной никелевого слоя 10 мкм, квазистатические МЭ характеристики которой представлены на рисунке 3 (а).



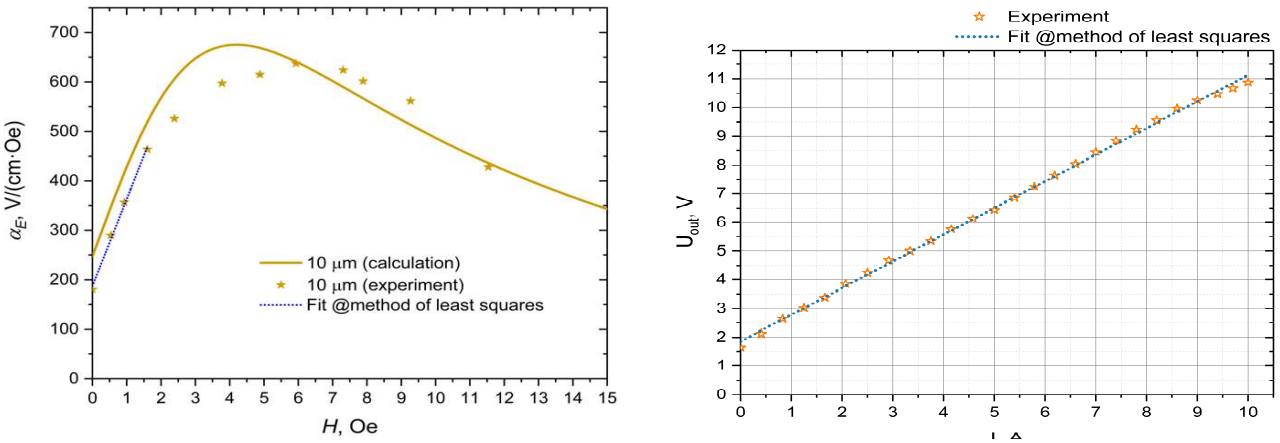
(а) (б)

а – Квазистатические зависимости, б – Зависимость величины внешнего постоянного МП, необходимого для вывода МЭ структуры в начало линейного участка, от толщины никелевых слоев

Рисунок 2 – МЭ структуры «бидоменный кристалл $LiNbO_3$ / Ni / Metglas» с толщинами никелевого слоя 2 мкм, 3 мкм, 4 мкм,5 мкм, 7 мкм и 10 мкм

Калибровка датчика проведена в диапазоне подаваемых токов вплоть до 10 А при подаче модулирующего переменного МП амплитудой 0,2 Э и частотой, соответствующей ЭМР МЭ структуры. Экспериментальные данные и линейная аппроксимация, полученная методом наименьших квадратов, зависимости амплитуды выходного МЭ сигнала от величины тока в металлической шине представлены на рисунке 3 (б).

Коэффициент детерминации линейной аппроксимации полученных экспериментальных данных в исследуемом токовом диапазоне составил 0,998. В реализованной конфигурации чувствительность датчика тока составила 0,9 В/А.



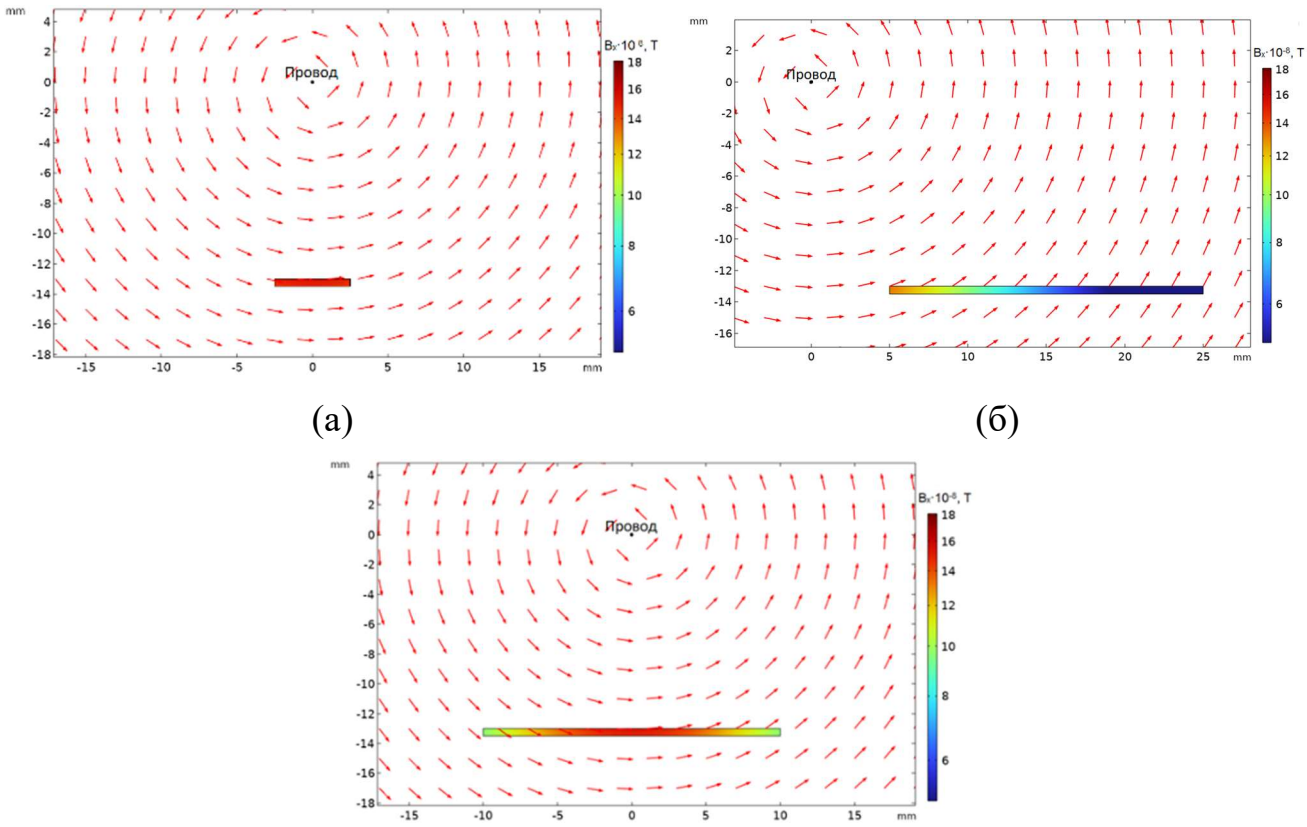
(а) (б)

а – Теоретическая и экспериментальная зависимости МЭ эффекта композитной структуры, б – Зависимость амипитуды выходного сигнала с датчика от величины тока

Рисунок 3 – Датчик тока на основе структуры «бидоменный кристалл $LiNbO_3$ / Ni / Metglas» с толщиной никелевого слоя 10 мкм

В **Главе 4** рассмотрены теоретическое распределение магнитной индукции в среде COMSOL Multiphysics, а также взаимодействие полученных градиентных МЭ структур с НМП от модельных источников: единичный проводник, соленоид и два взаимноперпендикулярных провода.

В случае взаимодействия градиентной МЭ структуры с НМП от единичного проводника рассмотрены несколько положений образца относительно единичного провода. Полученные модели распределения МП в плоскости для разных вариантов расположения МЭ структуры относительно единичного провода представлены на рисунке 4 (а-в). Динамические зависимости МЭ отклика структуры в этих же положениях при разных значениях тока в проводнике представлены на рисунке 5 (а-в). Оптимальное расположение градиентной структуры получено в случае, когда центр МЭ образца расположен на одной вертикальной оси с проводником, при этом длина МЭ структуры перпендикулярна проводу.



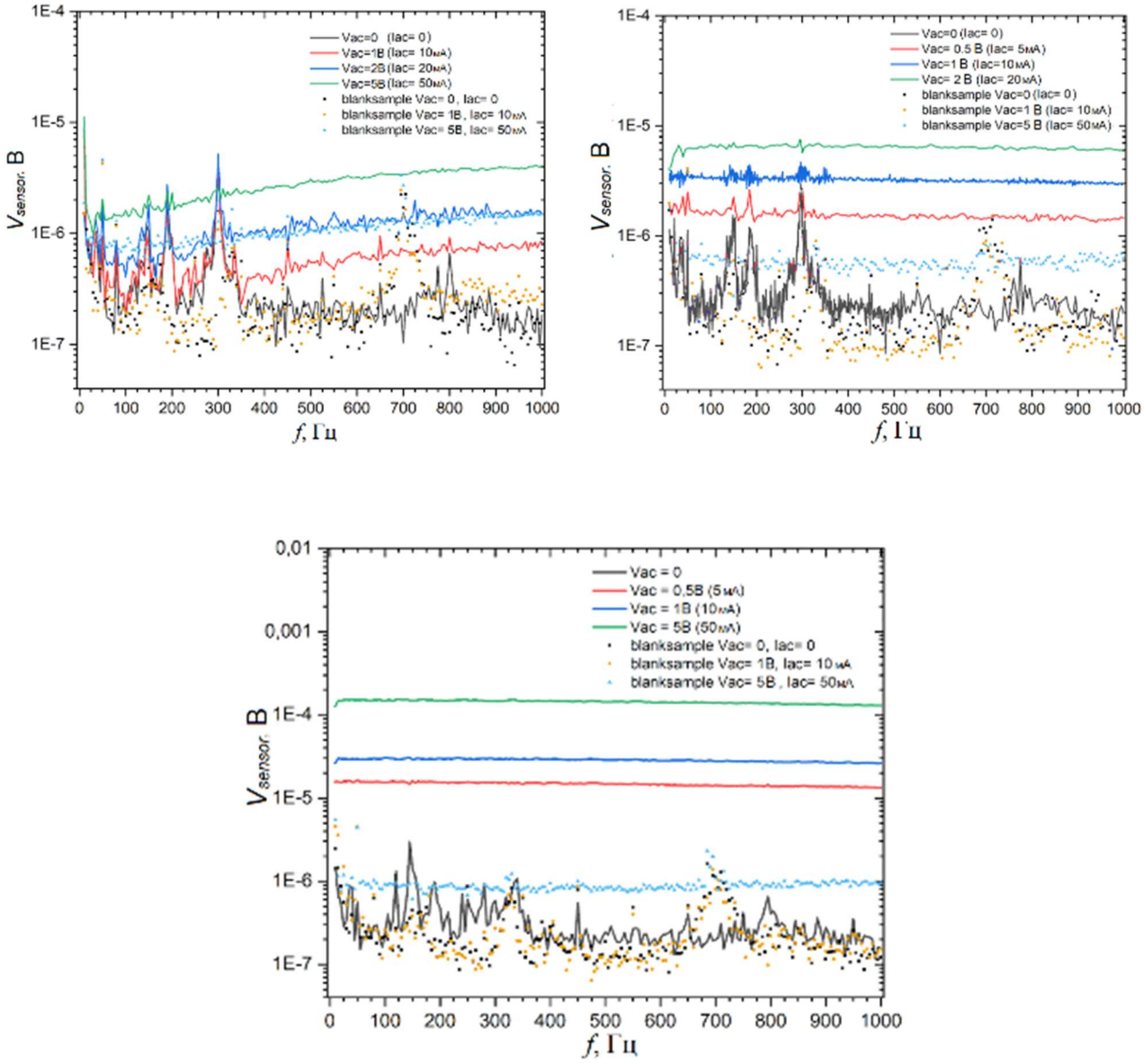
(а) (б)

(в)

Рисунок 4 – Модель распределения магнитной индукции от единичного провода

После определения оптимального расположения МЭ структуры относительно единичного провода проведено картирование распределения НМП от единичного проводника. При картировании НМП от единичного провода, по которому протекал ток амплитудой 100 мА и частотой 232 Гц, первоначальное расположение МЭ структуры соответствует координатам –10 мм по оси X и 7 мм по оси Z, шаг перемещения вдоль оси X составляет 1 мм, вдоль оси Z – 2 мм. Изменение координаты вдоль оси Z производилось после прохождения всех возможный расположений МЭ композита на одном Z-уровне. Полученное распределение НМП от единичного провода представлено на рисунке 6. Полученный результат коррелирует с теоретическим представлением распределения НМП от единичного провода. Наличие смещения координаты максимального значения выходного

сигнала МЭ структуры относительно положения провода сохраняется на всех рассмотренных Z-уровнях.



(в)

Рисунок 5 – Экспериментальные зависимости выходного МЭ сигнала и уровни шума на частотном диапазоне от 10 Гц до 1 кГц

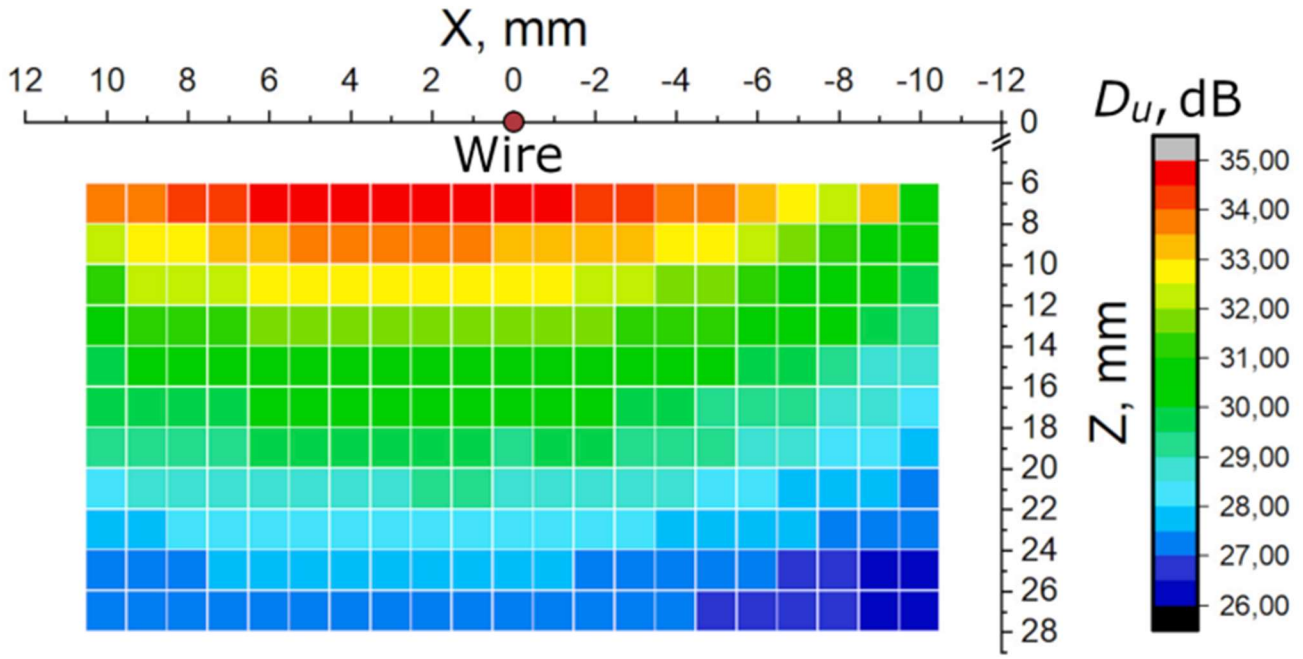
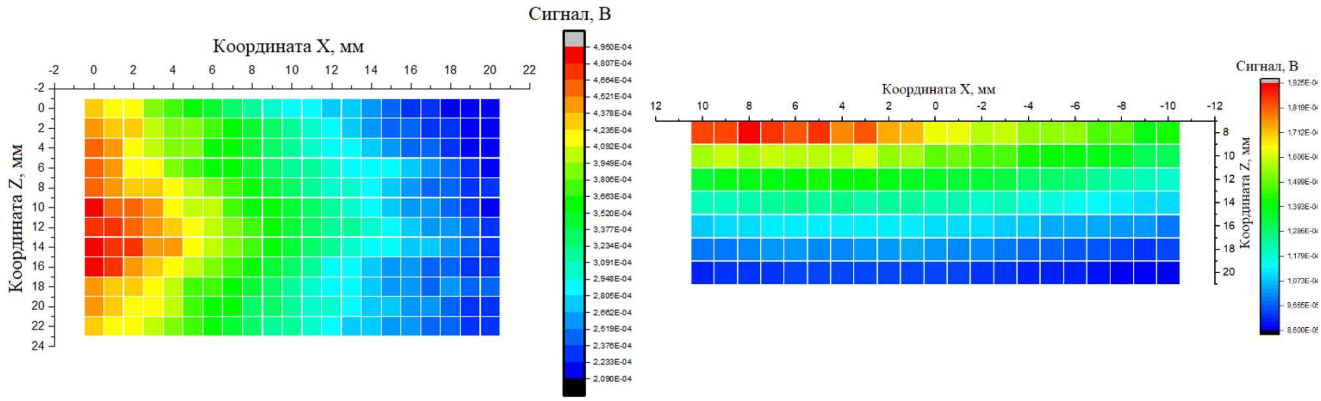


Рисунок 6 – Распределение НМП от единичного провода

Методика измерения распределения НМП от соленоида и двух взаимноперпендикулярных проводников не изменилась. Результаты детектирования представлены на рисунке 7 (а,б).



(а) (б)

а – соленоид, б – два взаимноперпендикулярных проводника

Рисунок 7 – Распределение от различных источников НМП

Представлено регистрация импульсных магнитных сигналов, имитирующих магнитные проявления сердечной активности, градиентной структурой. Детектирование магнитного сигнала специфичной формы с использованием МЭ структуры состоит из трех этапов: определение частотной зависимости выходного МЭ сигнала под воздействием подаваемого на провод сигнала, определение частотной зависимости чувствительности МЭ сенсора к исследуемому НМП и математическая обработка полученных данных. Сравнение временных зависимостей магнитного сигнала и преобразованного МЭ сигнала представлены на рисунке 8. Пики на временной зависимости преобразованного МЭ сигнала соответствуют «R»-пикам магнитного сигнала сердечной активности. Разница во времени между пиками мала, тем самым отклик МЭ структуры на резкое увеличение НМП является практически мгновенным.

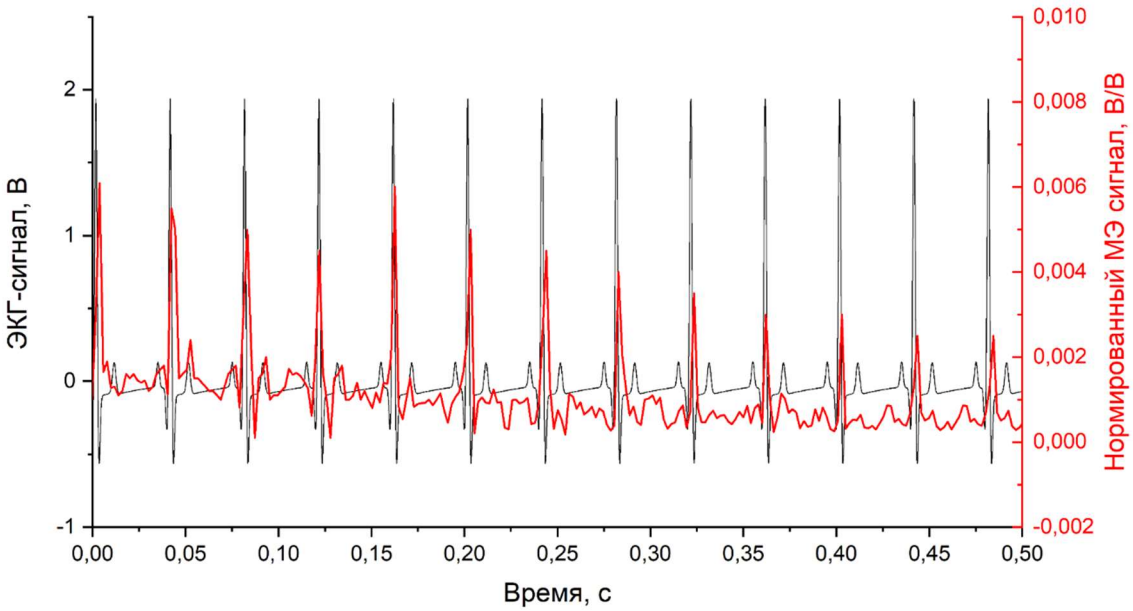


Рисунок 8 – Временные зависимости магнитного сигнала, имитирующего магнитное проявление сердечной активности, и преобразованного МЭ сигнала

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты представленной работы соответствуют цели диссертации – созданию градиентных МЭ композитных структур «бидоменный кристалл $LiNbO_3$ / Ni / Metglas» с ненулевым МЭ откликом в остутствие внешнего постоянного МП и исследованию их МЭ характеристик.

В экспериментальной части работы получены следующие результаты:

– Разработана установка для получения никельсодержащих подмагничивающих слоев методом электрохимического осаждения. Средняя скорость электрохимического осаждения Ni – 0.3 мкм/мин. При осаждении получен текстурированный поликристаллический Ni с преимущественной ориентацией зерен Ni (100);

– Создана установка, программа для исследования МЭ характеристик градиентных композитных МЭ структур и измерительная плата на основе ОУ TL071CP. Катушки Гельмгольца с переводным коэффициентом 7.0786 Э/А создают однородное МП в объеме цилиндра с высотой 100 мм и диаметром 80 мм.;

– Реализована установка для проведения термической обработки структур «бидоменный кристалл $LiNbO_3$ / Ni» в постоянном МП. С помощью МСМ показано упорядочение магнитной структуры Ni вдоль направления приложенного внешнего МП после проведения отжига;

– Предложена теоретическая модель взаимодействия магнитотвердого слоя Ni и магнитомягкого Metglas, использование которой позволяет определить смещения полевой зависимости при известных соотношении толщин слоев и остаточной намагниченности слоя Ni. Представлено использование градиентной структуры «бидоменный кристалл $LiNbO_3$ / Ni / Metglas» в качестве сенсорной части датчика тока с переводным коэффициентом 0.9 В/А. Оптимальная толщина слоя Ni, необходимая для вывода зависимости в начало линейного участка, для использования в датчике тока составила 9 мкм;

– Полученные с помощью градиентной структуры распределения НМП от различных модельных источников схожи с теоретическими распределениями. Разработан и запатентован способ картирования распределения НМП;

– Представлена и оценена возможность регистрации с использованием градиентной МЭ структуры импульсных сигналов, имитирующих магнитные проявления сердечной активности, и математической постобработки для выделения информативных компонентов.

Основные положения диссертационной работы изложена в следующих публикациях:

[1] **Kuts V.V.** Features of 2D mapping technique of non-uniform magnetic fields using self-biased magnetoelectric composites based on “bidomain LiNbO3/Ni/Metglas” structures / **Kuts V.V.**, Turutin A.V., Kubasov I.V., Temirov A.A., Kislyuk A.M., Maksumova E.E., Fedulov F.A., Fetisov Yu.K., Malinkovich M.D., Parkhomenko Yu.N. // Measurement – 2025. – Т. 242;

[2] **Kuts V.V.** Detection of inhomogeneous magnetic fields using magnetoelectric composites / **Kuts V.V.**, Turutin A.V., Kislyuk A.M., Kubasov I.V., Maksumova E.E., Temirov A.A., Malinkovich M.D., Sobolev N.A., Parkhomenko Yu. N. // Modern Electronic Materials – 2023. – Т. 9 – №3;

[3] **Kuts V.V.** Magnetoelectric effect in three-layered gradient $LiNbO_3$/Ni/Metglas composites / **Kuts V.V.**, Turutin A.V., Kislyuk A.M., Kubasov I.V., Zhukov R.N., Temirov A.A., Malinkovich M.D., Sobolev N.A., Parkhomenko Yu.N. // Modern Electronic Materials – 2022. – Т. 8 – №4;

[4] Bichurin M.I. Self-Biased Bidomain $LiNbO_3$/Ni/Metglas Magnetoelectric Current Sensor / Bichurin M.I., Petrov R.V., Leontiev V.S., Sokolov O.V., Turutin A.V., **Kuts**

V.V., Kubasov I.V., Kislyuk A.M., Temirov A.A., Malinkovich M.D., Parkhomenko Yu. N. // Sensors – 2020. – Т. 20 – №24;

[5] Bichurin M.I. Magnetoelectric Magnetic Field Sensors: A Review / Bichurin M.I., Petrov R.V., Sokolov O.V., Leontiev V.S., **Kuts V.V.**, Kiselev D.A., Wang Ya. // Sensors – 2021. – Т. 21 – №18;

[6] Turutin A.V. Magnetoelectric MEMS Magnetic Field Sensor Based on a Laminated Heterostructure of Bidomain Lithium Niobate and Metglas / Turutin A.V., Skryleva E.A., Kubasov I.V., Milovich F.O., Temirov A.A., Raketov K.V., Kislyuk A.M., Zhukov R.N., Senatulin B.R., **Kuts V.V.**, Malinkovich M.D., Parkhomenko Yu.N., Sobolev N.A. // Materials – 2023. – Т. 16 – №2.

Патенты:

Способ измерения и картирования неоднородных магнитных полей с использованием градиентного магнитоэлектрического сенсора // Патент на изобретение РФ RU 2841489C1, опубликован 06.06.2025, приоритет 06.12.24 / **Куц В.В.**, Кислюк А.М., Темиров А.А., Турутин А.В., Кубасов И.В., Малинкович М.Д., Пархоменко Ю.Н., Максумова Э.Э., Иванов В.П.

Список использованных источников:

1. Ландау, Л.Д.; Лифшиц, Е.М. Теоретическая Физика: Электродинамика Сплошных Сред; 4е изд.; ФИЗМАТЛИТ: Москва, 2005; Том 8; ISBN 5-9221-0123-4.
2. Folen, V.J.; Rado, G.T.; Stalder, E.W. Anisotropy of the Magnetoelectric Effect in Cr2O3. *Phys. Rev. Lett.* 1961, *6*, 607–608, doi:10.1103/PhysRevLett.6.607.
3. Astrov, D.N. Magnetoelectric Effect in Chromium Oxide. *Soviet Physics Letp* 1961, *14*, 729–733.
4. Zhai, J.; Xing, Z.; Dong, S.; Li, J.; Viehland, D. Magnetoelectric Laminate Composites: An Overview. *J. Am. Ceram. Soc.* 2008, *91*, 351–358, doi:10.1111/j.1551-2916.2008.02259.x.
5. Hu, J.-M.; Nan, C.-W. Opportunities and Challenges for Magnetoelectric Devices. *APL Mater.* 2019, *7*, 080905, doi:10.1063/1.5112089.
6. Priya, S.; Islam, R.; Dong, S.; Viehland, D. Recent Advancements in Magnetoelectric Particulate and Laminate Composites. *J. Electroceramics* 2007, *19*, 149–166, doi:10.1007/s10832-007-9042-5.
7. Srinivasan, G. Magnetoelectric Composites. *Annu. Rev. Mater. Res.* 2010, *40*, 153–178, doi:10.1146/annurev-matsci-070909-104459.
8. Zhou, Y.; Maurya, D.; Yan, Y.; Srinivasan, G.; Quandt, E.; Priya, S. Self-Biased Magnetoelectric Composites: An Overview and Future Perspectives. *Energy Harvest. Syst.* 2016, *3*, 1–42, doi:10.1515/ehs-2015-0003.
9. Eerenstein, W.; Mathur, N.D.; Scott, J.F. Multiferroic and Magnetoelectric Materials. *Nature* 2006, *442*, 759–765, doi:10.1038/nature05023.
10. Chu, Z.; PourhosseiniAsl, M.; Dong, S. Review of Multi-Layered Magnetoelectric Composite Materials and Devices Applications. *J. Phys. Appl. Phys.* 2018, *51*, 243001, doi:10.1088/1361-6463/aac29b.
11. Yang, X.; Gao, Y.; Wu, J.; Beguhn, S.; Nan, T.; Zhou, Z.; Liu, M.; Sun, N.X. Dual H- and E-Field Tunable Multiferroic Bandpass Filter at K_U-Band Using Partially

Magnetized Spinel Ferrites. *IEEE Trans. Magn.* 2013, *49*, 5485–5488, doi:10.1109/TMAG.2013.2266897.

12. Wu, R.; MacManus-Driscoll, J.L. Recent Developments and the Future Perspectives in Magnetoelectric Nanocomposites for Memory Applications. *APL Mater.* 2022, *10*, 010901, doi:10.1063/5.0076106.

13. Shen, J.; Cong, J.; Shang, D.; Chai, Y.; Shen, S.; Zhai, K.; Sun, Y. A Multilevel Nonvolatile Magnetoelectric Memory. *Sci. Rep.* 2016, *6*, 34473, doi:10.1038/srep34473.

14. Li, X.; Lee, A.; Razavi, S.A.; Wu, H.; Wang, K.L. Voltage-Controlled Magnetoelectric Memory and Logic Devices. *MRS Bull.* 2018, *43*, 970–977, doi:10.1557/mrs.2018.298.

15. Филиппов, Д.А.; Галкина, Т.А.; Маничева, И.Н.; Zhang, J. Магнитоэлектрический гиратор на основе трехслойных симметричных структур: теория и эксперимент. *Журнал Технической Физики* 2023, *93*, 1347, doi:10.21883/JTF.2023.09.56222.50-23.

16. Xin, B.; Zhang, Q.; Hu, L.; Gao, A.; Duan, C.; Gong, Z.; Song, E.; Sun, L.; Jiao, J. Wide-Temperature-Range Tachometer Based on a Magnetoelectric Composite. *Sensors* 2025, *25*, 829, doi:10.3390/s25030829.

17. Chu, Z.; Cui, J.; Wang, Y.; Du, Z.; PourhosseiniAsl, M.; Li, N.; Dan, W.; Gao, X.; Liang, X. Multilayered Magnetoelectric Composites for Precise and Wide-Range Current Sensing. *Appl. Phys. Lett.* 2024, *124*, 252907, doi:10.1063/5.0217772.

18. Huang, T.; Becerra, L.; Gensbittel, A.; Zheng, Y.; Talleb, H.; Salas, U.A.; Ren, Z.; Marangolo, M. Self-Biased Magnetoelectric Ni / Li Nb O 3 / Ni Trilayers for Body-Embedded Electronic Energy Harvesters. *Phys. Rev. Appl.* 2023, *20*, 034059, doi:10.1103/PhysRevApplied.20.034059.

19. Wang, Y.; Li, J.; Viehland, D. Magnetoelectrics for Magnetic Sensor Applications: Status, Challenges and Perspectives. *Mater. Today* 2014, *17*, 269–275, doi:10.1016/j.mattod.2014.05.004.

20. Gao, J.; Jiang, Z.; Zhang, S.; Mao, Z.; Shen, Y.; Chu, Z. Review of Magnetoelectric Sensors. *Actuators* 2021, *10*, 109, doi:10.3390/act10060109.

21. Turutin, A.V.; Vidal, J.V.; Kubasov, I.V.; Kislyuk, A.M.; Malinkovich, M.D.; Parkhomenko, Y.N.; Kobeleva, S.P.; Pakhomov, O.V.; Kholkin, A.L.; Sobolev, N.A. Magnetoelectric Metglas/Bidomain *y* + 140°-Cut Lithium Niobate Composite for Sensing fT Magnetic Fields. *Appl. Phys. Lett.* 2018, *112*, 262906, doi:10.1063/1.5038014.

22. *The SQUID Handbook*; Clarke, J., Braginski, A.I., Eds.; Wiley-VCH: Weinheim, 2004; ISBN 978-3-527-40411-7.

23. Gerginov, V.; Krzyzewski, S.; Knappe, S. Pulsed Operation of a Miniature Scalar Optically Pumped Magnetometer. *J. Opt. Soc. Am. B* 2017, *34*, 1429, doi:10.1364/JOSAB.34.001429.

24. Freitas, P.P.; Ferreira, R.; Cardoso, S.; Cardoso, F. Magnetoresistive Sensors. *J. Phys. Condens. Matter* 2007, *19*, 165221, doi:10.1088/0953-8984/19/16/165221.

25. Wouters, C.; Vranković, V.; Rössler, C.; Sidorov, S.; Ensslin, K.; Wegscheider, W.; Hierold, C. Design and Fabrication of an Innovative Three-Axis Hall Sensor. *Sens. Actuators Phys.* 2016, *237*, 62–71, doi:10.1016/j.sna.2015.11.022.

26. Marauska, S.; Jahns, R.; Greve, H.; Quandt, E.; Knöchel, R.; Wagner, B. MEMS Magnetic Field Sensor Based on Magnetoelectric Composites. *J. Micromechanics Microengineering* 2012, *22*, 065024, doi:10.1088/0960-1317/22/6/065024.

27. Marauska, S.; Jahns, R.; Kirchhof, C.; Claus, M.; Quandt, E.; Knöchel, R.; Wagner, B. Highly Sensitive Wafer-Level Packaged MEMS Magnetic Field Sensor Based on Magnetoelectric Composites. *Sens. Actuators Phys.* 2013, *189*, 321–327, doi:10.1016/j.sna.2012.10.015.

28. Mandal, S.K.; Sreenivasulu, G.; Petrov, V.M.; Srinivasan, G. Magnetization-Graded Multiferroic Composite and Magnetoelectric Effects at Zero Bias. *Phys. Rev. B* 2011, *84*, 014432, doi:10.1103/PhysRevB.84.014432.

29. Friedrich, R.-M.; Faupel, F. Adaptive Model for Magnetic Particle Mapping Using Magnetoelectric Sensors. *Sensors* 2022, *22*, 894, doi:10.3390/s22030894.

30. Friedrich, R.-M.; Sadeghi, M.; Faupel, F. Numerical and Experimental Study of Colored Magnetic Particle Mapping via Magnetoelectric Sensors. *Nanomaterials* 2023, *13*, 347, doi:10.3390/nano13020347.

31. Lukat, N.; Friedrich, R.-M.; Spetzler, B.; Kirchhof, C.; Arndt, C.; Thormählen, L.; Faupel, F.; Selhuber-Unkel, C. Mapping of Magnetic Nanoparticles and Cells Using Thin Film Magnetoelectric Sensors Based on the Delta-E Effect. *Sens. Actuators Phys.* 2020, *309*, 112023, doi:10.1016/j.sna.2020.112023.

32. Friedrich, R.-M.; Zabel, S.; Galka, A.; Lukat, N.; Wagner, J.-M.; Kirchhof, C.; Quandt, E.; McCord, J.; Selhuber-Unkel, C.; Siniatchkin, M.; et al. Magnetic Particle Mapping Using Magnetoelectric Sensors as an Imaging Modality. *Sci. Rep.* 2019, *9*, 2086, doi:10.1038/s41598-018-38451-0.

33. Huong Giang, D.T.; Dang, D.X.; Toan, N.X.; Tuan, N.V.; Phung, A.T.; Duc, N.H. Distance Magnetic Nanoparticle Detection Using a Magnetoelectric Sensor for Clinical Interventions. *Rev. Sci. Instrum.* 2017, *88*, 015004, doi:10.1063/1.4973729.

34. Özden, M.-Ö.; Teplyuk, A.; Gümüs, Ö.; Meyners, D.; Höft, M.; Gerken, M. Magnetoelectric Cantilever Sensors under Inhomogeneous Magnetic Field Excitation. *AIP Adv.* 2020, *10*, 025132, doi:10.1063/1.5136239.