MATEPИAЛOBEДEHИE И ТЕХНОЛОГИЯ. МАГНИТНЫЕ MATEPИAЛЫ / MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY. MAGNETIC MATERIALS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2023. Т. 26, № 4. С. 279—289. DOI: 10.17073/1609-3577j.met202309.554

УДК 621.318

Детектирование неоднородных магнитных полей при помощи магнитоэлектрического композита

© 2023 г. В. В. Куц^{1,},, А. В. Турутин¹, И. В. Кубасов¹, А. М. Кислюк¹, Э. Э. Максумова¹, А. А. Темиров¹, Н. А. Соболев^{1,2}, М. Д. Малинкович¹, Ю. Н. Пархоменко¹

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация

² Университет Авейру, Департамент Физики, 3810–193 Авейру, Португалия

[™]Автор для переписки: viktor.kuts.3228@yandex.ru

Аннотация. Перспективность использования магнитоэлектрических (МЭ) композитов обусловлена широким спектром их возможного применения, особенно в качестве сенсоров малых магнитных полей при комнатной температуре в медико-диагностическом оборудовании для магнитокардиографии и магнитоэнцефалографии. В большинстве работ по изучению МЭ-композитов структуры измеряют в однородных магнитных полях, однако, для практического применения необходимо детальное рассмотрение взаимодействия с неоднородными магнитными полями (НМП). Проведены измерения НМП с радиальной симметрией, возникающего вокруг тонкого провода с переменным электрическим током, при разных положениях МЭ-датчика относительно единичного провода. Для детектирования НМП подготовлена градиентная МЭ–структур b–LN/Ni/Metglas с коэффициентом чувствительности к магнитному полю 120 В/Тл. За счет наличия слоя никеля и его остаточной намагниченности не было необходимости в подаче подмагничивающего поля. МЭ-композит показал ненулевое значение МЭ-коэффициента (0,24 В/(см·Э)) в отсутствии постоянного внешнего магнитного поля. Показано, что амплитуда выходного сигнала с МЭ-композита, расположенного в переменном НМП, зависит от взаимного расположения исследуемого образца и силовых линий магнитного поля от единичного проводника. При этом наибольший сигнал достигается, когда длинная сторона МЭ-образца перпендикулярна к проводнику с током, а плоскость симметрии, разделяющая длинную сторону пластины пополам, содержит ось проводника. В области частот от 400 Гц до 1 кГц, где влияние вибрационных шумов и других наводок не дает большой вклад, лимит детектирования структуры составляет ($2 \pm 0,4$) нТл/Гц^{1/2}.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, композитные структуры, подмагничивающий слой, бидоменный ниобат лития, метглас, никель, неоднородное магнитное поле

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–19–00808, https://rscf.ru/project/22-19-00808/

Для цитирования: Куц В.В., Турутин А.В., Кубасов И.В., Кислюк А.М., Максумова Э.Э., Темиров А.А., Соболев Н.А., Малинкович М.Д., Пархоменко Ю.Н. Детектирование неоднородных магнитных полей при помощи магнитоэлектрического композита. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2023; 26(4): 279—289. https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202309.554

Detection of inhomogeneous magnetic fields by magnetoelectric composite

V. V. Kuts^{1,⊠}, A. V. Turutin¹, I. V. Kubasov¹, A. M. Kislyuk¹, E. E. Maksumova¹, A. A. Temirov¹, N. A. Sobolev^{1,2}, M. D. Malinkovich¹, Yu. N. Parkhomenko¹

¹ National University of Science and Technology "MISIS", 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation

² Universidade de Aveiro, 3810–193 Aveiro, Portugal

Corresponding author: viktor.kuts.3228@yandex.ru

Abstract. Magnetoelectric (ME) composites can be useful due to their wide range of possible applications, especially as sensors of weak magnetic fields at room temperature for magnetocardiography and magnetoencephalography techniques in medical diagnostic equipment. In most works on the topic of ME composites, structures are tested in uniform magnetic fields; however, for practical application, a detailed consideration of the interaction with inhomogeneous magnetic fields (IMF) is necessary. In this work we made measurements of IMF with radial symmetry of individual thin wire with AC voltage with different placements of ME sensor. A ME self–biased structure b–LN/Ni/Metglas with a sensitivity to magnetic field of 120 V/T was created for IMFdetection. The necessity of external biasing magnetic field is avoided by a nickel layer and its remanent magnetization. ME composite shows a non–zero ME coefficient of 0.24 V/(cm·Oe) in absence of DC external magnetic field. It is shown that output voltage amplitude from ME composite, which is located in AC IMF, is dependent from relative position of investigated sample and magnetic field lines. Maximum ME signal is obtained when long side of ME sample is perpendicular to the wire, and symmetry plane which divides the long side in two similar pieces contains an axis of the wire. In frequency range from 400 Hz to 1000 Hz in absence of vibrational and other noises a limit of detection has value of $(2 \pm 0.4) nT/Hz^{1/2}$.

Keywords: magnetoelectric effect, composite structures, biasing layer, bidomain lithium niobate, metglas, nickel, inhomogeneous magnetic field

Acknowledgments: The study was performed with financial support from the Russian Science Foundation (grant No. 22–19–00808, https://rscf.ru/project/22-19-00808/).

For citation: Kuts V.V., Turutin A.V., Kubasov I.V., Kislyuk A.M., Maksumova E.E., Temirov A.A., Sobolev N.A., Malinkovich M.D., Parkhomenko Yu.N. Detection of inhomogeneous magnetic fields by magnetoelectric composite. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2023; 26(4): 279–289. https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202309.554

Введение

Интерес к магнитоэлектрическим (МЭ) композитам обусловлен широким спектром их возможного применения в различных устройствах электроники [1]. Одним из многообещающих и наиболее близких к практической реализации направлений является применение композитных МЭ-материалов в качестве чувствительных элементов в датчиках сверхслабых магнитных полей [2—6], используемых в медико-диагностическом оборудовании для магнитокардиографии (МКГ), магнитоэнцефалографии (МЭГ) и магнитомиографии (ММГ). В настоящее время эти медицинские методики реализованы с использованием датчиков на основе СКВИД-магнетометров или магнетометров с оптической накачкой, имеющих достаточно жесткие ограничения по рабочему температурному диапазону. Ранее было показано, что магнитное поле сердечной мышцы может быть успешно зарегистрировано сенсором с композитной МЭ-структурой AlN/Si/Metglas [7]. Использование чувствительных элементов на основе МЭ-композитов в перспективе позволит удеше-

^{© 2023} National University of Science and Technology "MISIS".

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

вить оборудование для МКГ, МЭГ и ММГ благодаря исключению из конструкции громоздких систем охлаждения, а также способности датчиков работать в более широком динамическом диапазоне напряженностей магнитного поля и с большим пространственным разрешением.

Для успешного внедрения МЭ-композитов в устройства биомедицины требуется не только создание материала с высоким значением МЭ-коэффициента, но и решение целого ряда инженерных задач, связанных с оптимизацией рабочего частотного диапазона (активность нейронов детектируется на частотах ниже 1 кГц), выделением полезного сигнала в условиях высокой плотности шумов различной природы [8], уменьшением габаритов и энергопотребления сенсоров без потери чувствительности. С целью улучшения характеристик варьируют форм-фактор образцов МЭ-структур [9], исследуют различные комбинации материалов пьезоэлектрических (ПЭ) (AlN [10, 11], AlScN [12], PZT [13] и др.) и магнитострикционных (МС) слоев (метглас [5, 14-20]), получают ненулевой МЭ-эффект без подачи внешнего подмагничивающего поля различными методами [14, 21—23], сравнивают разные способы крепления образцов (свободный зажим, консольное и биконсольное крепление [24, 25]).

Чаще всего МЭ-свойства композитов измеряют в пространственно-однородном магнитном поле (ОМП). Хотя такой подход полезен для регистрации частотной зависимости чувствительности к магнитному полю в исследовательских целях, практическое предназначение сенсоров заключается в измерении пространственно неоднородных магнитных полей (НМП). Одна из наиболее распространенных задач по изучению НМП — картирование пространственного распределения напряженности магнитного поля. В этом случае, кроме значения МЭ-чувствительности, существенную роль начинает играть размер и геометрическая форма используемого сенсора, а также его положение относительно силовых линий поля. Исключение этих факторов из рассмотрения может приводить к неочевидным эффектам. Например, при изучении пространственного распределения напряженности магнитного поля от единичного витка с током при помощи композитного МЭ-образца было обнаружено [26], что внешний вид зависимости измеряемого сигнала от положения датчика относительно витка изменяется с частотой переменного тока в витке, а при некоторых значениях координаты отклик стремится к нулю. В работе [27] последовательный учет всех определяющих факторов и глубокий анализ обратной задачи по картированию поля с помощью датчика на основе МЭ-композита FeCoSiB/Si/AlN позволил восстановить изображение надписи, нарисованной

на подложке наночастицами типа «ядро–оболочка» (core-shell) магнетита.

Ниже рассмотрены результаты измерения НМП с радиальной симметрией, возникающего вокруг единичного тонкого провода с переменным электрическим током, при разных положениях МЭ-датчика относительно единичного провода. Выбор такого источника НМП обусловлен сходством распределения напряженности магнитного поля вокруг него с магнитным полем единичного нейрона [28]. По нашим данным, ранее подобное исследование не проводилось. Измерен МЭ-отклик при разных положениях образца относительно единичного провода.

Образцы и методы исследования

Для измерения НМП проводника с переменным электрическим током использовали трехслойный градиентный МЭ-композит типа 2–2 с бидоменным кристаллом ниобата лития (b–LN) в качестве ПЭ-слоя, метгласом в качестве МС-слоя и никелем в качестве подмагничивающего слоя.

Бидоменная структура типа «голова-кголове» сформирована в кристалле ниобата лития Y + 128°-среза путем отжига вблизи точки Кюри с аут-диффузией (обратной диффузией) оксида лития, выбор среза продиктован высоким значением поперечного ПЭ-модуля d_{23 (Y+128°)} ≈ 26 пКл/Н [29]. Размеры кристалла b–LN составляли $20 \times 5 \times$ 0,5 мм³. На одну из сторон пластины b-LN методом электрохимического осаждения нанесен слой никеля толщиной 10 мкм, в качестве электрода использовали тонкую пленку титана (150 нм), предварительно нанесенную методом магнетронного распыления мишени. Для создания остаточной намагниченности структуру b-LN/Ni отжигали в постоянном магнитном поле с амплитудой 2500 Э при температуре 380 °C и времени выдержки 2 мин, согласно методике, предложенной в работе [30]. На последнем этапе подготовки МЭ-композита на структуру b-LN/Ni с помощью эпоксидного состава наклеивали слой метгласа марки 2826МВ (Hitachi, Япония) толщиной 29 мкм.

Для проведения измерений образец консольно зажимали в держателе между двух пластин монокристаллического сапфира и закрепляли на печатной плате с монтажными отверстиями и распаянным предусилителем. В качестве предусилителя использовали повторитель напряжения на операционном усилителе TL071CDR (ST Microelectronics, США). Выбор TL071CDR был продиктован сочетанием доступности, низкого шума напряжения и малого значения входного тока.

Фотография платы, а также принципиальная схема усилителя представлены на рис. 1. При измерениях плату экранировали от внешних наводок



Рис. 1. Внешний вид (*a*) и электронная схема (б) измерительной платы с МЭ–образцом в держателе. МЕ — МЭ–сигнал; *Z*_{ME} — импеданс МЭ–структуры; TL071CDR — операционный усилитель; Lock–in V_{in} — входной канал синхронного детектора

Fig. 1. (a) Appearance and (δ) electric circuit of a ME structure in holder placed on PCB (designations in the figure: ME is the magnetoelectric output signal, Z_{ME} is magnetoelectric–structure impedance, TL071CDR is an operational amplifier and Lock–in V_{in} is the lock–in amplifier input voltage)

путем помещения ее в заземленный алюминиевый корпус.

Частотную зависимость МЭ-коэффициента изготовленного образца исследовали в переменном ОМП, которое создавали с помощью катушек Гельмгольца. Частоту и амплитуду напряженности магнитного поля в катушках задавали от генератора синхронного детектора MFLI (Zurich Instruments, Швейцария), сигнал с которого усиливали с помощью усилителя AE Techron 7224. Возникающий на образце МЭ-сигнал поступал на повторитель напряжения, описанный выше, после чего направлялся в измерительный тракт синхронного детектора. Такая установка позволяет проводить измерение МЭ-отклика в квазистатическом и динамическом режиме [30].

Квазистатические измерения проводили для определения величины смещения полевой зависимости МЭ-коэффициента за счет остаточной намагниченности слоя никеля и оценки значения МЭ-коэффициента в отсутствие внешнего постоянного магнитного поля, а также его сравнения с величиной МЭ-коэффициента при оптимальном постоянном магнитном поле. Постоянное поле изменяли в пределах от -25 Э до +25 Э, одновременно прикладывали переменное синусоидально изменяющееся модулирующее магнитное поле с амплитудой 0,1 Э и частотой 117 Гц.

Далее проводили исследование изготовленного МЭ-образца b-LN/Ni/Metglas динамическим методом для получения частотной зависимости МЭ-коэффициента. В экспериментах использовали переменное синусоидально изменяющееся магнитное поле с амплитудой 0,1 Э и частотой, изменявшейся в диапазоне 10 Гц — 1 кГц с шагом 5 Гц. Постоянное подмагничивающее поле не подавалось.



Рис. 2. Зависимости МЭ–коэффициента структуры b–LN/Ni/Metglas от амплитуды постоянного магнитного поля Fig. 2. ME coefficient of the b–LN/Ni/Metglas structure as a function of DC magnetic field amplitude

Описание установки для измерения магнитного поля от провода и характеризации МЭ градиентной структуры

В качестве источника НМП использовали медный провод диаметром 0,2 мм и длиной 40 см. Через провод пропускали электрические переменные токи амплитудой 0, 5, 10 и 50 мА, в качестве источника сигнала — генератор синхронного детектора MFLI с последовательно подключенным токоограничивающим резистором с номиналом 100 Ом. Для исключения влияния индуктивной составляющей в электрической цепи были проведены измерения импеданса системы провод-резистор, которые показали отсутствие значимой индуктивной составляющей во всем диапазоне рабочих частот (10—1000 Гц), полный импеданс системы провод-резистор составлял 100 Ом. Плату-предусилитель с МЭ-образцом в экранирующем корпусе размещали относительно провода с помощью трехкоординатного позиционера производства Thorlabs, управляемого микрометрическими винтами вручную. Все измерения проводились в полосе пропускания фильтра синхронного детектора, равной 1 Гц.

Результаты и их обсуждение

Магнитоэлектрические характеристики структуры b–LN/Ni/Metglas. Результат квазистатических измерений представлен на рис. 2.

Максимальное значение МЭ-коэффициента структуры (1,96 В/(см · Э)) достигается при подаче постоянного магнитного поля напряженностью — 7,5 Э. В отсутствие постоянного внешнего магнитного поля МЭ-коэффициент исследованного образца имеет ненулевое значение, равное 0,24 В/(см · Э) (см. рис. 2, б). Стоит отметить, что смещение зависимости МЭ-коэффициента от амплитуды постоянного магнитного поля относительно нуля составляет 0,5 Э, что сопоставимо с величиной магнитного поля Земли. Поэтому для нивелирования вклада магнитного поля Земли во всех представленных экспериментах образец располагался таким образом, чтобы силовые линии магнитного поля Земли были перпендикулярны к его длине.

Динамические измерения МЭ–коэффициента композита, исследованного в работе, проводили в отсутствие внешнего постоянного магнитного поля, т. е. при подмагничивании только за счет остаточной намагниченности слоя никеля. Результаты динамических измерений представлены на рис. 3.

Значение МЭ-коэффициента структуры b-LN/Ni/Metglas варьируется в диапазоне от 0,22 до 0,26 В/(см·Э) при изменении частоты от 10 до 1000 Гц. Средняя чувствительность МЭ-образца в квазилинейной области (10—1000 Гц) составляет $S_{\rm av} = 120$ В/Тл, что сопоставимо с ранее полученными результатами. Так, в работе [31] была достигнута чувствительность 856 В/Тл на частоте изгибного резонанса структуры Si/MnIr/Metglas/AlN, а в работе [32] для образца Metglas/Pb(Zr,Ti)O₃ вне резонанса структуры на частоте 1 кГц чувствительность составила 600 В/Тл.

Моделирование распределения магнитного поля от единичного провода в трехмерном пространстве. Распределение магнитного поля от бесконечного единичного провода рассчитывали для трехмерной модели в среде программирования COMSOL Multiphysics. Для моделирования выбрали три варианта расположения образца относительно провода (рис. 4). Во всех случаях плоскость образца совпадала с плоскостью ХҮ, расстояние вдоль оси Z между МЭ-образцом и проводом составляло 13 мм, так как это значение являлось минимально возможным для рассматриваемой конфигурации экранирующего корпуса. В положении А провод располагался вдоль длинной стороны образца; в положении Б длинная сторона образца была перпендикулярна к проводу, расстояние между проводом и торцом образца вдоль оси Х составляло 5 мм; в положение В длинная сторона образца была перпендикулярна к проводу, середина длинной стороны находилась на оси Z. Амплитуда переменного тока в медном проводе при моделировании принималась равной 10 мА.

Результаты моделирования распределения проекции поля вектора магнитной индукции на ось *X B*_X в сечении образца представлены на рис. 4.

Так как МЭ-образец имеет геометрическую форму тонкой узкой пластины, закрепленной консольно вдоль оси X, наибольший вклад в МЭ-отклик дает проекция поля вектора магнит-



Рис. 3. Зависимость МЭ–коэффициента структуры b–LN/Ni/Metglas от частоты в отсутствие внешнего постоянного магнитного поля

Fig. 3. ME coefficient of the b–LN/Ni/Metglas structure as a function of frequency without external DC magnetic field



Рис. 4. Визуализация результатов моделирования напряженности магнитного поля от единичного проводника в окрестности МЭ–образца в положении A (*a*), Б (б), В (*в*).

Стрелки — направление вектора магнитной индукции в точках

Fig. 4. Visualization of simulation results for magnetic field intensity of a single wire near the ME specimen in Positions (a) A, (b) B and (b) C. Arrows show magnetic induction vector directions in the points

ной индукции на ось Х. Именно в этом направлении магнитная индукция вносит наибольший вклад в МЭ–коэффициент и магнитострикцию, так как величина МЭ–коэффициента прямо пропорциональна длине рабочей части структуры [24, 33], а кристалл ниобата лития вырезан таким образом, что его длина совпадает с направлением наибольшего поперечного пьезокоэффициента. Следовательно, при одном и том же электрическом токе через провод МЭ–сигнал будет максимален в положении В, минимален — в положении А.

Измерение неоднородного магнитного поля от единичного проводника. Измерения отклика образца МЭ-композита b–LN/Ni/Metglas при воздействии на него переменного НМП от единичного провода выполняли в положениях А, Б и В, использованных для моделирования. Для каждого из предложенных положений образца относительно провода измеряли МЭ-сигнал при пропускании через провод переменного синусоидального тока с амплитудами 5, 10 и 50 мА в диапазоне частот от 10 Гц до 1 кГц с шагом 5 Гц. Для определения спектральной плотности наводимых на образец фоновых электромагнитных и акустических шумов также выполняли измерение МЭ-отклика в отсутствие тока в проводе. Дополнительно с целью определения величины электромагнитных наводок на плату и образец во время измерений в каждом из вариантов расположения образца проведены измерения отклика от монодоменного кристалла ниобата лития (blanksample — болванка) с напыленными электродами, но без магнитострикционного слоя. Результаты измерений представлены на рис. 5.

В положении A (см. рис. 5, *a*) частотная зависимость сигнала с МЭ-образца демонстрирует нелинейный характер, амплитуда отклика возрастает с увеличением частоты переменного тока. При этом из-за неоптимального положения образца МЭ-композита относительно провода сигнал имеет значительно меньшую амплитуду, чем в положении МЭ-структуры Б и В. Тем не менее, для амплитуды переменного тока в проводе больше 50 мА сигнал превышает собственный шум измерительной части и внешние наводки и уверенно регистрируется во всем диапазоне исследованных частот. При подаче переменного тока с амплитудой 20 и 10 мА полезный сигнал с МЭ-образца различим только на частотах, превышающих 400 Гц.

При положениях образца Б и В (см. рис. 5, б и в) прослеживается линейная зависимость выходного сигнала со структуры от частоты переменного тока в проводнике.

В положении В (см. рис. 5, *в*) уровень шума, детектируемого с болванки и МЭ-образца при условии, когда сигнал не подается на единичный проводник ($V_{ac} = 0, I = 0$), много меньше (на порядок величины) сигнала, детектируемого с МЭ-структуры при подаче переменного тока с амплитудой 5 мА. Таким образом, можно утверждать, что сигнал, измеряемый МЭ-сенсором от единичного проводника, является достоверным и содержит лишь незначительный вклад внешних вибрационных шумов и электромагнитных наводок. Однако при амплитуде переменного тока в проводнике, равной 50 мА, уровень электромагнитных наводок на болванку начинает превышать уровень шума (напряжение наведенного сигнала превышает 1 мкВ). В этом случае электромагнитная индукция Фарадея и токи Фуко, наведенные на образец и измерительную схему, становятся неотличимы от полезного МЭ– сигнала [34]. Однако эта паразитная наводка мала по сравнению с полезным сигналом от МЭ образца. Так, при той же амплитуде переменного тока в проводе, равной 50 мА, уровень сигнала от МЭ–образца составляет примерно 150 мкВ, что на несколько порядков величины выше уровня сигнала наводки. Таким образом, паразитным сигналом можно пренебречь. Аналогичные выводы можно







Рис. 5. Результаты измерений магнитного поля от провода (V_{ac}) с помощью МЭ–структуры и сигнал от болванки в положении A (*a*), Б (*б*), В (*в*)

Fig. 5. The magnetic field of a wire measured with the ME structure and the signal of a blank sample in Positions (a) A, (6) B and (B) C

сделать и для положения Б МЭ-образца относительно единичного проводника.

При положении В МЭ–структуры относительно единичного проводника амплитуда МЭ–сигнала составляет ~30 мкВ при амплитуде переменного тока 10 мА, что соответствует среднему значению магнитного поля ($B_{\rm av} = V_{\rm ME}$ (при 10 мА)/ $S_{\rm av}$), действующего на МЭ–структуру вдоль длины образца. При этом, согласно результатам моделирования, приведенным на рис. 4, в среднее значение проекции индукции магнитного поля B_{mod} на длинную сторону образца составляет порядка 127 нТл.

Среднее значение проекции индукции магнитного поля на длинную сторону образца в положении Б составляет, согласно модели, 74 нТл, а расчет на основе полученных экспериментальных данных,



Рис. 6. Спектральная плотность предела детектирования (LOD) магнитного поля градиентного МЭ–композита со структурой b–LN/Ni/Metglas

Fig. 6. Spectral density of magnetic field LOD for b-LN/Ni/Metglas gradient ME composite structure

учитывающий чувствительность МЭ–образца, дает значение 28 нТл для амплитуды переменного тока в проводе, равной 10 мА.

Разница значений магнитного поля, рассчитанного из экспериментальных данных $(B_{\rm av})$ и из модельных представлений $(B_{\rm mod})$, может быть объяснена сочетанием нескольких факторов:

ошибки в измерении чувствительности S_{av};

 – неточности определения пространственной координаты образца при его позиционировании относительно провода (экранирующий бокс не позволяет визуально контролировать точное положение сенсора относительно провода);

 – учет в приведенных оценках только проекции поля магнитной индукции на ось, совпадающую с длинной стороной образца.

Поэтому мы допускаем как занижение полученных результатов, так и их завышение. Кроме того, ни при обработке экспериментальных результатов, ни при моделировании не учитывалось влияние размагничивающего фактора градиентной структуры и влияние остаточной намагниченности никеля на МЭ-отклик с образца в области НМП. В дальнейшем будет проведен более глубокий анализ этих факторов с целью разработки модели, позволяющей более точно предсказывать экспериментальные результаты.

Для определения минимально возможного сигнала, который может быть детектирован изготовленным в работе образцом МЭ-композита, из экспериментальных данных была рассчитана

Библиографический список / References

1. Turutin A.V., Kubasov I.V., Kislyuk A.M., Kuts V.V., Malinkovich M.D., Parkhomenko Y.N., Sobolev N.A. Ultra– sensitive magnetoelectric sensors of magnetic fields for biomedical applications. *Nanobiotechnology Reports*. 2022; 17(3): 261—289. https://doi.org/10.1134/S2635167622030223

2. Li M., Matyushov A., Dong C., Chen H., Lin H., Nan T., Qian Z., Rinaldi M., Lin Y., Sun N.X. Ultra-sensitive NEMS magnetoelectric sensor for picotesla DC magnetic field detection. *Applied Physics Letters*. 2017; 110(14): 143510. https://doi.org/10.1063/1.4979694

3. Jovičević Klug M., Thormählen L., Toxværd S.D., Höft M., Knöchel R., Quandt E., Meyners D., Röbisch V., McCord J. Antiparallel exchange biased multilayers for low magnetic noise magnetic field sensors. *Applied Physics Let*ters. 2019; 114(19): 192410. https://doi.org/10.1063/1.5092942

4. Jing W.Q., Fang F. A flexible multiferroic composite with high self-biased magnetoelectric coupling. *Composites Science and Technology*. 2017; 153: 145—150. https://doi. org/10.1016/j.compscitech.2017.10.010

5. Yang Sh.-Y., Xu J., Zhang X., Fan S., Zhang Ch.-Y., Huang Y., Li Q., Wang X., Cao D., Xu J., Li S. Self-biased metglas/PVDF/Ni magnetoelectric laminate for AC magnetic sensors with a wide frequency range. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2022; 55(17): 175002. https://doi. org/10.1088/1361-6463/ac4cf5

6. Turutin A.V., Skryleva E.A., Kubasov I.V., Milovich F.O., Temirov A.A., Raketov K.V., Kislyuk A.M., частотная зависимость предела детектирования сигнала (LOD — Limit of Detection). График LOD (рис. 6) показывает предельную чувствительность МЭ-образца в условиях эксперимента к внешнему переменному магнитному полю. Очевидно влияние низкочастотных вибрационных шумов, которые обуславливают выбросы в области 130—160 Гц до 11 нТл/Гц^{1/2}. В области частот (от 400 Гц до 1 кГц), где влияние вибрационных шумов и других наводок не дает большой вклад, LOD структуры составляет 2 ± 0.4 нТл/Гц^{1/2}.

Заключение

Изготовлен образец МЭ-композита b-LN/Ni/ Metglas МЭ-коэффициент которого в отсутствие внешнего постоянного магнитного поля имеет ненулевое значение, равное 0,22—0,26 B/(см·Э), и чувствительность к магнитному полю 120 В/Тл, что сопоставимо с результатами работы [31]. Показано, что амплитуда выходного сигнала с МЭ-композита в переменном НМП зависит от взаимного расположения исследуемого образца и силовых линий поля. При этом наибольший сигнал достигается, когда длинная сторона образца перпендикулярна к проводнику с током, а плоскость симметрии, разделяющая длинную сторону пластины пополам, содержит ось проводника. В дальнейшем планируется провести картирование МП от единичного провода для определения пространственного разрешения предложенного сенсора НМП.

Zhukov R.N., Senatulin B.R., Kuts V.V., Malinkovich M.D., Parkhomenko Y.N., Sobolev N.A. Magnetoelectric MEMS magnetic field sensor based on a laminated heterostructure of bidomain lithium niobate and metglas. *Materials (Basel)*. 2023; 16(2): 484. https://doi.org/10.3390/ma16020484

7. Elzenheimer E., Hayes P., Thormählen L., Engelhardt E., Zaman A., Quandt E., Frey N., Höft M., Schmidt G. Investigation of converse magnetoelectric thin–film sensors for magnetocardiography. *IEEE Sensors Journal*. 2023; 23(6): 5660—5669. https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3237910

8. Reermann J., Elzenheimer E., Schmidt G. Real-time biomagnetic signal processing for uncooled magnetometers in cardiology. *IEEE Sensors Journal*. 2019; 19(11): 4237—4249. https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2893236

9. Ma J.N., Xin C.Z., Ma J., Lin Y.H., Nan C.W. Design and analysis of a self-biased broadband magnetoelectric cantilever operated at multi-frequency windows. *AIP Advances.* 2017; 7(3): 035013. https://doi.org/10.1063/1.4978872

10. Greve H., Woltermann E., Quenzer H.–J., Wagner B., Quandt E. Giant magnetoelectric coefficients in $(Fe_{90}Co_{10})_{78}Si_{12}B_{10}$ –AlN thin film composites. *Applied Physics Letters*. 2010; 96(18): 182501. https://doi. org/10.1063/1.3377908

11. Hayes P., Schell V., Salzer S., Burdin D., Yarar E., Piorra A., Knöchel R., Fetisov Y.K., Quandt E. Electrically modulated magnetoelectric AlN/FeCoSiB film composites for DC magnetic field sensing. *Journal of Physics D: Applied* *Physics*. 2018; 51(35): 354002. https://doi.org/10.1088/1361-6463/aad456

12. Su J., Niekiel F., Fichtner S., Thormaehlen L., Kirchhof C., Meyners D., Quandt E., Wagner B., Lofink F. AlScN-based MEMS magnetoelectric sensor. *Applied Physics Letters*. 2020; 117(13): 132903. https://doi. org/10.1063/5.0022636

13. Huang D., Lu C., Han B., Wang X., Li C., Xu C., Gui J., Lin C. Giant self-biased magnetoelectric coupling characteristics of three-phase composite with end-bonding structure. *Applied Physics Letters*. 2014; 105(26): 263502. https://doi.org/10.1063/1.4904799

14. Mandal S.K., Sreenivasulu G., Petrov V.M., Srinivasan G. Magnetization–graded multiferroic composite and magnetoelectric effects at zero bias. *Physical Review B*. 2011; 84(1): 014432. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.014432

15. Li M., Wang Z., Wang Y., Li J., Viehland D. Giant magnetoelectric effect in self–biased laminates under zero magnetic field. *Applied Physics Letters*. 2013; 102(8): 082404 https://doi.org/10.1063/1.4794056

16. Deka B., Lee Y.–W., Yoo I.–R., Gwak D.–W., Cho J., Song H.–C., Choi J.–J., Hahn B.–D., Ahn C.–W., Cho K.–H. Designing ferroelectric/ferromagnetic composite with giant self–biased magnetoelectric effect. *Applied Physics Letters*. 2019; 115(19): 192901. https://doi.org/0.1063/1.5128163

17. Huang D., Lu C., Bing H. Multipeak self-biased magnetoelectric coupling characteristics in four-phase Met-glas/Terfenol-D/Be-bronze/PMN-PT structure. *AIP Advances.* 2015; 5(4): 047140. https://doi.org/10.1063/1.4919248

18. Zhang H., Lu C., Sun Z. Large self-biased magnetoelectric response in four-phase Heterostructure with multiple low-frequency peaks. *Applied Physics Letters*. 2015; 106(3): 033505. https://doi.org/10.1063/1.4906414

19. Fetisov L.Y., Dzhaparidze M.V., Savelev D.V., Burdin D.A., Turutin A.V., Kuts V.V., Milovich F.O., Temirov A.A., Parkhomenko Y.N., Fetisov Y.K. Magnetoelectric effect in amorphous ferromagnetic FeCoSiB/langatate monolithic heterostructure for magnetic field sensing. *Sensors (Basel).* 2023; 23(9): 4523. https://doi.org/10.3390/ s23094523

20. 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., Sobolev N.A. Magnetoelectric effect in the bidomain lithium niobate/nickel/metglas gradient structure. *Physica Status Solidi (B): Basic Solid State Physics*. 2020; 257(3): 1900398. https://doi.org/10.1002/ pssb.201900398

21. Yang S.-C., Park C.-S., Cho K.-H., Priya S. Selfbiased magnetoelectric response in three-phase laminates. *Journal of Applied Physics*. 2010: 108(9): 093706. https://doi. org/10.1063/1.3493154

22. Kumar A., Arockiarajan A. Temperature dependent magnetoelectric (ME) response in press–fit FeNi/PZT/ Ni self–biased ring composite. *Journal of Applied Physics*. 2019; 126(9): 094102. https://doi.org/10.1063/1.5108708

23. 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 Y.N. Self-biased bidomain LiNbO₃/Ni/metglas magnetoelectric current sensor. *Sensors (Basel)*. 2020; 20(24): 7142. https://doi.org/10.3390/s20247142 24. Turutin A.V., Vidal J.V., Kubasov I.V., Kislyuk A.M., Malinkovich M.D., Parkhomenko Y.N., Kobeleva S.P., Kholkin A.L., Sobolev N.A. Low-frequency magnetic sensing by magnetoelectric metglas/bidomain LiNbO₃ long bars. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2018; 51(21): 214001. https://doi.org/10.1088/1361-6463/aabda4

25. Huo Y., Sofronici S., Wang X., D'Agati M.J., Finkel P., Bussmann K., Mion T., Staruch M., Jones N.J., Wheeler B., McLaughlin K.L., Allen M.G., Olsson R.H. Low noise, strain modulated, multiferroic magnetic field sensor systems. *IEEE Sensors Journal*. 2023; 23(13): 14025—14040. https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3279229

26. Özden M.-Ö., Teplyuk A., Gümüs Ö., Meyners D., Höft M., Gerken M. Magnetoelectric cantilever sensors under inhomogeneous magnetic field excitation. *AIP Advances*. 2020; 10(2): 025132. https://doi.org/10.1063/1.5136239

27. Friedrich R.–M., Zabel S., Galka A., Lukat N., Wagner J.–M., Kirchhof C., Quandt E., McCord J., Selhuber– Unkel C., Siniatchkin M., Faupel F. Magnetic particle mapping using Magnetoelectric sensors as an imaging modality. *Scientific Reports.* 2019; 9(1): 2086. https://doi.org/0.1038/ s41598-018-38451-0

28. Isakovic J., Dobbs–Dixon I., Chaudhury D., Mitrecic D. Modeling of inhomogeneous electromagnetic fields in the nervous system: A novel paradigm in understanding cell interactions, disease etiology and therapy. *Scientific Reports.* 2018; 8(1): 12909. https://doi.org/0.1038/s41598-018-31054-9

29. Kubasov I.V., Kislyuk A.M., Turutin A.V., Malinkovich M.D., Parkhomenko Y.N. Bidomain ferroelectric crystals: Properties and prospects of application. *Russian Microelectronics*. 2021; 50(8): 571—616. https://doi.org/10.1134/ S1063739721080035

30. 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 Y.N. Magnetoelectric effect in three–layered gradient LiNbO₃/Ni/Metglas composites. *Modern Electronic Materials*. 2022; 8(4): 141—147. https://doi.org/0.3897/j. moem.8.4.98951

31. Spetzler B., Bald C., Durdaut P., Reermann J., Kirchhof C., Teplyuk A., Meyners D., Quandt E., Höft M., Schmidt G., Faupel F. Exchange biased delta–E effect enables the detection of low frequency *pT* magnetic fields with simultaneous localization. *Scientific Reports*. 2021; 11(1): 5269. https://doi.org/10.1038/s41598-021-84415-2

32. Gao J., Das J., Xing Z., Li J., Viehland D. Comparison of noise floor and sensitivity for different magnetoelectric laminates. *Journal of Applied Physics*. 2010; 108(8): 084509. https://doi.org/10.1063/1.3486483

33. Vidal J.V., Turutin A.V., Kubasov I.V., Malinkovich M.D., Parkhomenko Y.N., Kobeleva S.P., Kholkin A.L., Sobolev N.A. Equivalent magnetic noise in magnetoelectric laminates comprising bidomain LiNbO₃ crystals. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control.* 2017; 64(7): 1102—1119. https://doi.org/10.1109/ TUFFC.2017.2694342

34. More-Chevalier J., Cibert C., Bouregba R., Poullain G. Eddy currents: A misleading contribution when measuring magnetoelectric voltage coefficients of thin film devices. *Journal of Applied Physics*. 2015; 117(15): 154104. https://doi.org/10.1063/1.4917534

Информация об авторах / Information about the authors

Куц Виктор Викторович — младший научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: https:// orcid.org/0000-0002-9780-5686; e-mail: viktor.kuts.3228@ yandex.ru

Турутин Андрей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1090-3441; e-mail: aturutin92@gmail.com

Кубасов Илья Викторович — канд. физ.–мат. наук, старший научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6569-466X; e-mail: kubasov.ilya@ gmail.com

Кислюк Александр Михайлович — научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: https://orcid. org/0000-0001-7185-8715; e-mail: akislyuk94@gmail.com

Максумова Эвелина Эдуардовна — бакалавр, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; e-mail: ewemaks12345@gmail.com

Темиров Александр Анатольевич — научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: https://orcid. org/0000-0001-9965-1046; e-mail: temirov.alex@yandex.ru

Соболев Николай Андреевич — канд. физ. – мат. наук, научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, лаборатория ФНС, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; доктор естественных наук, профессор, Университет Авейру, 3810–193 Авейру, Португалия; ORCID: https:// orcid.org/0000-0002-9420-8130; e-mail: niksob@gmail.com

Малинкович Михаил Давыдовыч — канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9531-6072; e-mail: malinkovich@ yandex.ru

Пархоменко Юрий Николаевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, научный руководитель, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1970-9867; e-mail: parkh@rambler.ru Viktor V. Kuts — Junior Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology "MISIS", 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9780-5686; e-mail: viktor.kuts.3228@yandex.ru

Andrei V. Turutin — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Senior Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology "MISIS", 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1090-3441; e-mail: aturutin92@gmail.com

Ilya V. Kubasov — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Senior Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology "MISIS", 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6569-466X; e-mail: kubasov.ilya@gmail.com

Alexander M. Kislyuk — Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology "MISIS", 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7185-8715; e-mail: akislyuk94@gmail.com

Evelina E. Maksumova — Bachelor, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology "MISIS", 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; e-mail: ewemaks12345@ gmail.com

Alexander A. Temirov — Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology "MISIS", 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9965-1046; e-mail: temirov.alex@yandex.ru

Nikolai A. Sobolev — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics; National University of Science and Technology "MISIS", 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; PhD, Associate Professor, Department of Physics, Universidade de Aveiro, 3810–193 Aveiro, Portugal; ORCID: https://orcid. org/0000-0002-9420-8130; e-mail: niksob@gmail.com

Mikhail D. Malinkovich — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology "MISIS", 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9531-6072; e-mail: malinkovich@yandex.ru

Yuri N. Parkhomenko — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Scientific Consultant, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology "MISIS", 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1970-9867; e-mail: parkh@rambler.ru

Поступила в редакцию 02.09.2023; поступила после доработки 30.09.2023; принята к публикации 17.10.2023 Received 2 September 2023; Revised 30 September 2023; Accepted 17 October 2023