

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной

и исследовательской деятельности

ФГАОУ ВО «Южный федеральный
университет»

доктор химических наук

_____ А.В. Метелица

«26» августа 2021 г.

Отзыв ведущей организации

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» на диссертацию Турутина Андрея Владимировича на тему: «Магнитоэлектрический эффект в композитных мультиферроиках на основе бидоменных кристаллов ниобата лития», представленную на соискание автором ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Актуальность исследований, проведенных в диссертационной работе.

Композитные мультиферроики обладают уникальными свойствами, за счет одновременного существования в них ферромагнитного и сегнетоэлектрического упорядочений. Исследование таких материалов открывает возможности по созданию целого ряда новых устройств электронной техники. Так, их высокая чувствительность к переменным магнитным полям при комнатной температуре позволит создавать прецизионные миниатюрные магнитометры промышленного и исследовательского классов для бесконтактного измерения сверхслабых токов, магнитных полей в живых организмах и визуализации магнитных

наночастиц. В связи с тем, что достигнутая на сегодняшний день чувствительность таких материалов к магнитному полю составляет единицы пТл, поиск и исследование новых композитных магнитоэлектрических (МЭ) структур с повышенной чувствительностью к магнитному полю представляется актуальным и своевременным.

Диссертационная работа Турутина А.В. посвящена изучению МЭ свойств и предела чувствительности к магнитному полю композитных мультиферроиков на основе бидоменных кристаллов ниобата лития (LiNbO_3 , LN), в которых достигнуты рекордные значения вышеуказанных параметров.

Общая характеристика работы.

Введение посвящено описанию цели и задач, поставленных в работе, ее актуальности и новизны. Дана общая характеристика проведенного исследования и представлены выдвигаемые к защите научные положения.

Глава 1 диссертационного исследования посвящена анализу современной литературы по тематике МЭ эффекта в композитных мультиферроиках. Приведен анализ преимуществ применения бессвинцовых пьезоэлектрических материалов в композитных мультиферроиках, которые могут конкурировать по величине МЭ эффекта с широко используемыми свинецсодержащими пьезокерамиками. Представлен обзор теоретических моделей для расчёта МЭ коэффициента в объектах исследования.

В главе 2 представлены результаты расчётов МЭ коэффициентов с применением низкочастотной модели на основе теории пьезоэлектричества, магнитострикции и эластодинамики тонких пластин для двуслойных композитных структур на основе бидоменных кристаллов LiNbO_3 / метглас.

Глава 3 посвящена разработке и калибровке измерительной системы для исследования МЭ эффекта в композитных мультиферроиках. Особое внимание уделено созданию однородного магнитного поля в объёме исследуемых структур. Для этого предварительно были проведены расчёты

системы катушек Гельмгольца, которые обеспечивают необходимую однородность подаваемого магнитного поля на образцы.

В главе 4 приведены основные экспериментальные результаты диссертации. Представлены исследования анизотропии МЭ коэффициента в структурах на основе бидоменных кристаллов $y+128^\circ$ -срез LiNbO_3 / метглас. Достигнуты рекордные значения чувствительности к переменному магнитному полю среди композитных мультиферроиков. Разработана структура МЭ сенсора в форме камертона на основе бидоменного кристалла LiNbO_3 $y+128^\circ$ -срез / метглас. Данная конструкция обеспечивает эффективное подавление низкочастотных вибрационных шумов как на резонансной частоте, так и вне её. Таким образом, МЭ структуры в форме камертона, выполненного на одной подложке, могут стать основой датчиков переменного и постоянного магнитных полей. Показано превосходство данной структуры над единичным МЭ датчиком.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Научная новизна.

- впервые в качестве пьезоэлектрического слоя в композитном мультиферроике использованы бидоменные кристаллы LN;
- проведены расчёты МЭ коэффициента композитных структур на основе моно- и бидоменных кристаллов LN / метгласа. Установлено, что МЭ коэффициент выше в композитных мультиферроиках на основе бидоменных кристаллов;
- в композитных мультиферроиках на основе бидоменных кристаллов LN $y+140^\circ$ -среза / метгласа получен гигантский МЭ коэффициент - 1704 В/(см·Э). Достигнута рекордная чувствительность к переменному магнитному полю среди композитных мультиферроиков, которая составила $92 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$ при комнатной температуре на частоте резонанса 6862 Гц;
- установлено, что применение МЭ сенсора с чувствительным элементом, выполненным в форме камертона, позволяет увеличить чувствительность к магнитному полю на резонансной частоте в 6,7 раза по

сравнению с единичным МЭ датчиком. На резонансной частоте спектральные плотности магнитного шума составляют $3 \text{ пТл/Гц}^{1/2}$ и $20 \text{ пТл/Гц}^{1/2}$ для МЭ камертона и единичного МЭ сенсора, соответственно. Усиление шумоподавления на нерезонансных частотах составляет от 7 до 25 раз МЭ камертоне по сравнению с единичным МЭ датчиком.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Представленные расчёты МЭ коэффициента в композитных мультиферроиках на основе бидоменных кристаллов LN / метгласа позволяют предсказывать оптимальный срез бидоменных кристаллов LN для создания МЭ сенсоров с максимальной чувствительностью к магнитному полю. Разработанная МЭ структура в форме камертона на основе бидоменного кристалла LN $y+128^\circ$ -среза/ метгласа позволяет увеличить чувствительность к низкочастотному магнитному полю в 6,7 раза по сравнению с единичной МЭ структурой. Получен патент на полезную модель (RU188677U1). В результате исследований предложена оптимальная структура композитного мультиферроика на основе бидоменного кристалла LN $y+128^\circ$ -среза / метгласа для создания коммерческих сенсорных систем детектирования сверхслабых магнитных полей.

Достоверность и надежность результатов.

Научные результаты выполненной работы обладают высокой степенью достоверности, что обеспечивается использованием современных экспериментального оборудования и методик, применением теоретических подходов, экспериментальных данных с сравнением результатами теоретических изысканий. Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в высокорейтинговых журналах, входящих в базы данных WoS и Scopus. Также достоверность полученных результатов подтверждается неоднократными выступлениями Трутина А.В. на международных конференциях с устными докладами по теме диссертационной работы.

Надежность полученных результатов подтверждается их непротиворечивостью основным физическим закономерностям, логике их

изменения в заданных обстоятельствах, согласием с известными библиографическими сведениями в данной области

Некоторые замечания.

1. В диссертационной работе приведен достаточно подробный литературный обзор по современному состоянию исследований в предметной области. Тем не менее, целесообразно было бы провести непосредственное сравнение численных значений лучших современных МЭ сенсоров магнитных полей и результатов, полученных в данной работе.
2. В главе 2 приведен расчёт эквивалентного магнитного шума для МЭ композитных структур на основе бидоменных кристаллов LN. В расчёте учитывался только тепловой шум пьезоэлектрических кристаллов, хотя формула (2.16) включает в себя суммарный шум МЭ структуры и измерительной системы. При этом расчёт и графики зависимости эквивалентного магнитного шума, полученные на основе указанной формулы, не приведены в работе.
3. В главе 3 представлено описание экспериментальной установки, которую Турутин А.В. рассчитал и сконструировал в ходе выполнения работы. Приведены её основные характеристик, калибровка, предельные значения и возможности по измерению параметров МЭ композитных материалов, однако изображение самой установки в работе отсутствует
4. В главе 4 на рисунке 4.9 ось абсцисс не имеет наименования на графике, по всей видимости, при форматировании название оси оказалось исключённым.

Отмеченные замечания не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы и не снижают научной и практической ценности выполненного исследования. Диссертационная работа Турутина А.В. на тему: «Магнитоэлектрический эффект в композитных мультиферроиках на основе бидоменных кристаллов ниобата лития» отвечает всем предъявляемым требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете

«МИСиС». Соискатель, Турутин Андрей Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук (01.04.07), директором НИИ физики Южного федерального университета Вербенко Ильей Александровичем (344090, г. Ростов-на-Дону, ул. 9-я линия, 65, тел.89085195838, эл. почта: iaverbenko@sfedu.ru).

Отзыв на диссертацию Турутина А.В. на тему: «Магнитоэлектрический эффект в композитных мультиферроиках на основе бидоменных кристаллов ниобата лития» обсужден и утвержден на семинаре отдела «Интеллектуальных материалов и нанотехнологий» НИИ физики ЮФУ (протокол № 3 от 19.05.2021 года).

Директор НИИ физики
Южного федерального
университета, доктор физико-
математических наук



Вербенко Илья Александрович