

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Фирсовой Татьяны Олеговны на тему «Линейный и нелинейный магнитоэлектрический эффект в магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах металл – пьезоэлектрик, металл – полимер – пьезоэлектрик», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Открытый более полувека назад магнитоэлектрический (МЭ) эффект до сих пор привлекает к себе пристальное внимание, поскольку позволяет связать между собой электрические и магнитные характеристики вещества. Это, в принципе, позволяет управлять магнитными свойствами вещества под действием электрического поля и наоборот, что обуславливает широкие возможности для создания принципиально новых устройств твердотельной электроники, например, таких как СВЧ фазовращатели и аттенюаторы, управление которыми осуществляется не магнитным, а электрическим полем, что значительно упрощает конструкцию прибора. Несмотря на свою привлекательность, МЭ эффект долгое время не находил широкого применения, поскольку его величина в монокристаллах довольно мала, и наблюдался он, как правило, при температурах значительно ниже комнатной. Повышенный интерес к исследованию МЭ эффекта в последнее время связан с созданием композиционных магнитоэлектрических материалов. Механизмом возникновения МЭ эффекта в композиционных материалах является механическое взаимодействие магнитострикционной и пьезоэлектрической подсистем, т.е. МЭ эффект в композитах возникает благодаря взаимосвязи электрических, магнитных и упругих свойств материала.

Механизмом возникновения МЭ эффекта в композиционных структурах является «произведение пьезоэлектричества на магнитострикцию». Если пьезоэлектрический эффект является линейной функцией электрического поля, то магнитострикция является нелинейной функцией напряженности магнитного поля, поэтому в общем случае возможен как линейный по напряженности магнитного поля эффект, так и нелинейный. Поскольку при поле подмагничивания $H_{bias} = 0$ магнитострикция имеет экстремум, то линейный МЭ эффект возможен

только при наличии поля подмагничивания. В отличие от него, нелинейный по магнитному полю эффект отличен от нуля и при отсутствии поля подмагничивания, причем при слабых полях подмагничивания его величина соизмерима с линейным эффектом. Если линейный эффект изучен достаточно подробно, то нелинейный эффект изучен крайне мало. Поэтому теоретические и экспериментальные исследования нелинейного эффекта и эффекта, возникающего в результате суперпозиции линейного и нелинейного сигналов, является **актуальной задачей**.

Структура диссертации традиционна: во введении лаконично и четко дается обоснование актуальности темы исследования, формулируются положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы. За введением следует первая глава, где автором диссертационной работы приведен подробный обзор литературы, посвященной состоянию исследования МЭ эффекта на данный момент. Вторая глава диссертации посвящена теоретическому исследованию МЭ эффекта в магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах. В третьей главе диссертации описаны экспериментальные исследования МЭ эффекта. В четвертой главе обсуждается практическое использование нелинейного МЭ эффекта. В заключении сформулированы основные результаты работы и выводы.

К научной новизне диссертации можно отнести представленное в работе детальное теоретическое описание нелинейного магнитоэлектрического эффекта в слоистых композиционных структурах с учетом конечной толщины слоев.

Наиболее значимые **новые научно-практические результаты** диссертационной работы заключаются, на мой взгляд, в исследовании магнитоэлектрического отклика, обусловленного суперпозицией линейного и нелинейного МЭ эффектов. Конкретно результаты состоят в следующем:

1. В области слабых полей магнитострикцию можно разложить в ряд с точностью до членов второго порядка, в результате чего можно рассматривать линейный по напряженности магнитного поля эффект совместно с нелинейным, величина которого не зависит от поля подмагничивания. Оба эффекта имеют резонансный характер, однако, поскольку величина нелинейного эффекта пропорциональна квадрату магнитного поля, то его резонансное возбуждение происходит на частоте магнитного поля в два раза меньшей частоты основного резонанса.

2. Впервые экспериментально обнаружен и исследован нелинейный эффект в структуре арсенид галлия – никель. Построена теория МЭ эффекта, где в качестве пьезоэлектрика выступает арсенид галлия, а магнитострикционного материала – никель. В отличие от традиционного пьезоэлектрика ЦТС, где отличными от нуля компонентами пьезомодуля являются d_{31} и d_{33} , которые связаны с продольными модами колебаний, в арсениде галлия отличным от нуля компонентами являются $d_{14} = d_{25} = d_{36}$, которые связаны с поперечными модами колебаний.

3. На основе частотных зависимостей линейного и нелинейного эффектов полученных структур экспериментально показано, что при суперпозиции сигналов от линейного и нелинейного эффектов разность соседних амплитуд пропорциональна приложенному постоянному магнитному полю.

4. Предложена технология изготовления структур металл – пьезоэлектрик методом электролитического осаждения. Показано, что использование подслоев *Au–Ge–Ni* для подложки из арсенида галлия и *V–Cu* для подложки из ЦТС позволяют получить слои никеля толщиной 20-30 мкм, имеющие хорошую адгезию с подложкой.

Обоснованность и достоверность результатов, научных положений и основных выводов диссертации не вызывает сомнений и основывается на согласованности теоретических результатов с данными эксперимента, подтверждается использованием хорошо известных и апробированных методов экспериментальных исследований и теоретического анализа. В частности, как предсказывает теория, резонансное возбуждение нелинейного МЭ эффекта происходит на частоте переменного магнитного поля, в два раза меньшей частоты основного резонанса, что в точности подтверждается экспериментально. Несомненным достоинством работы является сочетание теоретических моделей, технологии изготовления структур и их экспериментального исследования для **обоснования** адекватности предложенных положений, выводов и рекомендаций.

К **практической значимости результатов работы** можно отнести следующее:

1. Предложена теоретическая модель, которая позволяет рассчитывать характеристики нелинейного МЭ эффекта, необходимые для разработки устройств твердотельной электроники. Методика расчета этих характеристик реализована в Программе для ЭВМ (Свид. о гос. регистрации № 2016611132 от 15.02.2016).

2. Разработан новый способ измерения постоянного магнитного поля на основе нелинейного МЭ эффекта. Предложенный способ защищен патентом на изобретение.

3. Предложены конструкции принципиально новых устройств на основе нелинейного МЭ эффекта: «Дифференциальный датчик магнитного поля» и «Разностный датчик постоянного магнитного поля». Предложенные устройства защищены патентом на изобретение и патентом на полезную модель.

4. Предложен «Магнитоэлектрический удвоитель частоты» на основе нелинейного МЭ эффекта. На данное устройство подана заявка на изобретение.

Диссертационная работа отличается высоким уровнем осмысления проблемы, корректностью постановки задач и детальным анализом общих и частных вопросов. Данная диссертация четко структурирована, материал излагается логично, взвешенно, выводы подкреплены теоретическим расчетом и экспериментальными данными.

Однако по диссертационной работе имеется ряд замечаний.

1. В теоретических моделях рассмотрен в основном только продольный МЭ эффект и слишком мало места уделено поперечному МЭ эффекту, хотя этот случай наиболее часто реализуется на практике.

2. В работе не приведена оценка погрешности математической модели при сравнении полученных теоретических и экспериментальных данных.

3. Вследствие неидеальности структуры подложки при электролитическом осаждении возникают механические напряжения, которые оказывают влияние на механическую прочность структуры и величину эффекта. В работе не обсуждается, как можно уменьшить величину этих напряжений.

4. В работе следовало бы сократить объем выводов, поскольку они являются слишком громоздкими и заложенные в них идеи размыты по тексту.

Несмотря на приведенные замечания, в целом диссертация Фирсовой Т.О. является законченной научно-квалификационной работой, ее **основные результаты, выводы и научные положения обладают достоверностью, научной новизной и практической значимостью.** Автореферат и публикации по теме работы в достаточной степени отражают содержание диссертации, ее основные положения и выводы. Содержание диссертации соответствует формуле паспорта специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Основные результаты диссертационной работы отражены в 9 публикациях в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ. Они прошли апробацию на конференциях различного уровня.

По объему, научной новизне, значимости и достоверности диссертационная работа Фирсовой Татьяны Олеговны «Линейный и нелинейный магнитоэлектрический эффект в магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах металл – пьезоэлектрик, металл – полимер – пьезоэлектрик» соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» от 24 сентября 2013 года, № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук,
доцент, профессор кафедры физики
конденсированного состояния
Тверского государственного университета,
Солнышкин Александр Валентинович

26.05.2016 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Тверской государственный университет»
170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33.
Тел.: (4822) 58-14-93 (доб. 108); e-mail: a.solnyshkin@mail.ru

Директор по НИО

Татаркин И.

