



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной работе
федерального государственного
автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский
Политехнический университет
Петра Великого»,
доктор технических наук



О.С. Ипатов

2016 г.

ОТЗЫВ

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

Актуальность темы

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью выявления физических закономерностей магнитоэлектрического отклика системы в области слабых магнитных полей. Магнитоэлектрический (МЭ) эффект интересен как с научной, так и с практической точки зрения. С научной точки зрения МЭ эффект интересен тем, что он относится к так называемым перекрестным эффектам и связывает между собой величины, имеющие разные тензорные размерности: поляризацию (полярный вектор) с напряженностью магнитного поля (аксиальный вектор), и, наоборот, намагниченность (аксиальный вектор) с напряженностью электрического поля (полярный вектор). С практической точки зрения он интересен тем, что позволяет изменять магнитные характеристики вещества электрическим полем, и, наоборот, электрические параметры вещества магнитным полем. Это позволяет создавать на его основе принципиально новые устройства функциональной электроники, например, СВЧ фазовращатели и аттенюаторы, управление которых осуществляется не магнитным, а электрическим полем, что значительно упрощает конструкцию прибора. На основе инверсного МЭ возможно создавать трансформаторы, имеющие в отличие от классических, всего одну обмотку.

В монокристаллах величина МЭ эффекта мала и наблюдается он, как правило, при температурах, значительно ниже комнатных, поэтому широкого применения МЭ в монокристаллах на практике не нашел. В композиционных магнитоэлектрично-пьезоэлектрических материалах величина эффекта на несколько порядков больше, чем в

монокристаллах и наблюдается он при комнатных температурах. По технологии изготовления композиционные материалы делятся на объемные и слоистые. Объемные композиты изготавливаются по керамической технологии и представляют собой механически связанные смеси порошков феррита и пьезоэлектрика. Слоистые композиционные материалы состоят из чередующихся магнитострикционных и пьезоэлектрических слоев, механически связанных между собой. Слоистые композиты обладают целым рядом преимуществ по сравнению с объемными: они лучше поляризуются, позволяют в качестве магнитострикционной фазы использовать металлы с большим коэффициентом магнитострикции. Основной проблемой слоистых композитов является механическая связь между слоями. Они изготавливаются, как правило, с использованием промежуточного полимерного слоя (клея), что значительно ухудшает механическую связь между слоями, снижает добротность, ведет к сильной температурной зависимости. Поэтому предложенная в диссертационной работе технология изготовления магнитострикционно-пьезоэлектрических структур металл – пьезоэлектрик без использования промежуточного слоя и исследование их характеристик, безусловно, является актуальной задачей.

До настоящего времени основное внимание исследователей было уделено исследованию линейного МЭ эффекта, который наблюдается только при наличии поля подмагничивания. Вследствие особенности магнитострикции, наряду с линейным, возможен также и нелинейный по переменному магнитному полю МЭ эффект, который наблюдается и при отсутствии поля подмагничивания, когда линейный эффект отсутствует. Выявление особенностей нелинейного МЭ эффекта, а также эффектов, возникающих в результате суперпозиции сигналов от линейного и нелинейного МЭ эффектов, является актуальной задачей для разработчиков датчиков магнитного поля в области слабых магнитных полей.

С учетом вышеизложенного тема диссертационной работы является **актуальной**.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка используемых источников. Общий объем диссертации составляет 112 страниц машинописного текста, включающего 35 рисунков, 5 таблиц. Список цитированной литературы содержит 105 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и ее практическая значимость, четко сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна, приведены научные положения, выносимые на защиту. Описано внедрение результатов и апробация работы.

В первой главе приведен литературный обзор, посвященный исследованию МЭ эффекта. Описаны условия существования магнитоэлектрического эффекта. Рассмотрены особенности МЭ эффекта в монокристаллах и композиционных материалах. Представлены существующие методы теоретического описания и экспериментального исследования МЭ эффекта в композиционных материалах. Описана степень изучения нелинейного эффекта на момент исследования. Сформулирована постановка задачи исследования.

Во второй главе приведена теория линейного и нелинейного эффектов на основе совместного решения уравнений движения, обобщенного закона Гука и материальных уравнений. Получены аналитические выражения для линейного и нелинейного МЭ отклика системы. Показано, что оба эффекта имеют резонансный характер, но резонансное возбуждение, обусловленное нелинейным эффектом, происходит на частоте

магнитного поля в два раза меньшей частоты основного электромеханического резонанса. Построена теория МЭ эффекта для структуры арсенид галлия – никель. Данная структура является нетрадиционной для изучения МЭ эффекта, поэтому полученные результаты являются оригинальными. Поскольку наряду с пластинками часто используются структуры в виде дисков, то в работе также рассмотрен нелинейный эффект в дискообразной структуре. Рассмотрены симметричные трехслойные структуры металл – пьезоэлектрик – металл. Показано, что задача для симметричной трехслойной структуры сводится к задаче для двухслойной структуры с толщиной магнетика, равной толщине одного слоя и толщиной пьезоэлектрика, равной половине пьезоэлектрического слоя, что значительно упрощает проведение вычислений..

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию магнитоэлектрического эффекта. В ней описана технология изготовления структур металл – пьезоэлектрик, методом электролитического осаждения. Показано, что использование подслоев $Au - Ge - Ni$ для подложки из арсенида галлия и $V - Si$ для подложки из ЦТС позволяют получить хорошую адгезию между магнитострикционным слоем никеля и подложкой вплоть до толщин 30-5- мкм. Представлены результаты экспериментальных исследований полученных структур. Проведено исследование частотных зависимостей линейного и нелинейного МЭ эффектов полученных структур в области электромеханического резонанса. Экспериментально показано, что резонансное возбуждение нелинейного эффекта происходит на частоте магнитного поля в два раза меньшей частоты основного резонанса, что полностью согласуется с теорией, представленной во второй главе. Численные значения резонансных частот, предсказанные теоретически, находятся в хорошем согласовании с экспериментальными данными. Экспериментально показано, что резонансное значение величины нелинейного МЭ эффекта в области слабых полей не зависит от поля подмагничивания, что также совпадает с теоретическими предсказаниями. Экспериментально показано, что величина нелинейного МЭ эффекта квадратично зависит от напряженности переменного магнитного поля, что совпадает с теорией.

Четвертая глава посвящена практическому применению нелинейного МЭ эффекта. В ней показано, как при суперпозиции сигналов от линейного и нелинейного эффектов возникает разность соседних амплитуд, величина которой пропорциональна приложенному постоянному магнитному полю. На этом эффекте предложены новый способ измерения магнитного поля и конструкции дифференциального и разностного датчиков магнитного поля.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

Автором диссертационной работы получен целый ряд **новых научных результатов** в области выявления физических закономерностей МЭ отклика системы в слабых магнитных полях. Наиболее значимыми из этих результатов являются следующие:

1. Впервые представлено подробное теоретическое описание нелинейного МЭ эффекта в магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах в виде пластинки и диска с учетом конечной толщины слоев
2. Разработана технология изготовления слоистых МЭ структур методом гальванического осаждения с использованием подслоев для улучшения адгезии, полученных методом напыления
3. Впервые экспериментально обнаружен и исследован нелинейный эффект в структуре арсенид галлия – никель

4. Впервые экспериментально исследованы эффекты, возникающие в результате суперпозиции сигналов от линейного и нелинейного эффектов

5. Предложен принципиально новый способ измерения постоянного магнитного поля, основанный на использовании нелинейного МЭ эффекта

Достоверность проведенных исследований

Результаты диссертационной работы основаны на использовании основных законов теоретической физики и физики конденсированного состояния, корректному использованию допущений, строгой логичностью математических выводов, использованием современных методов экспериментальных исследований и совпадением полученных результатов с данными исследований других авторов.

Неоспоримым достоинством работы является сочетание теоретических расчетов величины эффекта, технологии изготовления структур, экспериментального исследования эффекта в данных структурах и сравнение полученных теоретических и экспериментальных данных.

Практическая ценность и значимость работы

1. Предложенная теоретическая модель позволяет рассчитать характеристики линейного и нелинейного МЭ эффекта на основе геометрических размеров структуры и параметров магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз, необходимые для разработчиков устройств твердотельной электроники. Методика расчета этих характеристик реализована в Программе для ЭВМ (Свид. о гос. регистрации № 2016611132 от 15.02.2016).

2. Разработанный новый способ измерения постоянного магнитного поля на основе нелинейного МЭ эффекта может быть положен в основу создания устройств для измерения слабых магнитных полей. Способ защищен патентом на изобретение № 2522128 от 15.05.2014.

3. Предложены конструкции принципиально новых устройств твердотельной электроники на основе нелинейного МЭ эффекта: «Дифференциальный датчик магнитного поля» и «Разностный датчик постоянного магнитного поля». Данные устройства также защищены патентом на изобретение № 2526593 от 26 июля 2014 и патентом на полезную модель №138798 от 26.02.2014.

4. На основе нелинейного МЭ эффекта предложен «Магнитоэлектрический удвоитель частоты», на который подана заявка на изобретение № 2015154127 от 16.12.2015.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Полученные автором научные результаты могут быть использованы для дальнейшего развития представлений о линейном и нелинейном эффектах в магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах в области слабых полей. Разработанная автором технология получения структур никель – арсенид галлия с использованием подслоев может быть применена и для изготовления структур другого состава. Результаты исследований могут быть использованы в научных и учебных организациях, в которых ведутся исследования по близкой тематике: в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого, Физико-техническом

институте им. А.Ф. Иоффе, Московском технологическом университете (МИРЭА), Тверском государственном университете, Воронежском государственном техническом университете, Башкирском государственном университете, Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, Физическом институте имени А.П. Лебедева, Институте общей физики имени А.М. Прохорова, Южном федеральном университете, а также в других вузах и научных организациях.

Основные положения и результаты работы опубликованы

- в 12 печатных работах, из которых 9 работ входят в Перечень рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК РФ
- докладывались и обсуждались на 12 Международных и Всероссийских конференциях
- новые технические решения защищены двумя патентами на изобретения, одним патентом на полезную модель и получено свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ

Как и любая новая научная работа, обсуждаемая диссертация не лишена слабых мест и недостатков.

Рецензенты и участники обсуждения сделали по работе следующие **замечания и пожелания:**

1. При исследовании МЭ эффекта в структуре никель – арсенид галлия длинная ось пластинки была ориентирована под углом 45° к оси соленоида. Хотелось бы видеть общую угловую зависимость и как при этом изменяется величина эффекта?
2. При описании моделей в основном используется продольная ориентация полей. Поперечной ориентации полей уделено недостаточное внимание, хотя на опыте в основном используется поперечная ориентация.
3. Достоинством работы является учет неоднородностей деформаций по толщине образца. Это хорошо отражает физический механизм эффекта, однако в работе не приводится количественная оценка величины этого эффекта.

Заключение

Сделанные в отзыве замечания не влияют на достоверность полученных результатов, их следует рассматривать, как рекомендации для дальнейших исследований. Диссертация представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему и обладающую внутренним единством. Она соответствует специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния». Диссертационная работа отвечает требованиям ВАК РФ в части п.9, Положения о порядке присуждения ученых степеней (утверждено Правительством Российской Федерации от 24 сентября 2013 г № 842). Новые научные результаты, полученные диссертантом, являются решением важной научной задачи в области исследований магнитоэлектрического эффекта в слабых полях.

С точки зрения актуальности, новизны и практической значимости полученных результатов соискатель Фирсова Татьяна Олеговна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Доклад Фирсовой Татьяны Олеговны Заслушан и обсужден на заседании кафедры экспериментальной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра

Великого. На заседании кафедры присутствовало 65 человек. За предложенное заключение проголосовали единогласно. Протокол № 8 от 3 июня 2016 года.

Заведующий кафедрой
экспериментальной физики,
доктор физико-математических наук



Иванов В.К.

Секретарь кафедры



Ершова Т.П.

