

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по инновационной деятельности МИРЭА



А.В. Рагуткин

«30» мая 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Беличевой Ксении Валерьевны «Магнитоэлектрический эффект в слоистых магнитострикционно-пьезо- электрических структурах с неоднородными компонентами», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - «Физика конденсированного состояния»

Магнитоэлектрические (МЭ) эффекты в объемных и слоистых композитных материалах, обладающих одновременно как ферромагнитными, так и сегнетоэлектрическими свойствами, интенсивно изучают в последние годы в связи с перспективами применения для создания новых устройств обработки информации, таких как высокочувствительные датчики магнитных полей, управляемые напряжением резонаторы, фильтры и фазовращатели и радио- и сверхвысокочастотного диапазонов, элементы магнитной памяти, переключаемые электрическим полем, автономные источники электрической энергии.

МЭ эффект позволяет изменять поляризацию материала с помощью магнитного поля (прямой эффект) или намагниченность материала с помощью электрического поля (обратный эффект). Наибольший по величине МЭ эффект обнаружен в искусственно созданных структурах, содержащих механически связанные ферромагнитные (ФМ) и пьезоэлектрические (ПЭ) слои. Проведенные к настоящему времени исследования показали, что величина эффекта сильно зависит от параметров используемых материалов, от геометрии структур, величин и ориентации магнитных и электрических полей.

Установлено также, что МЭ эффект возрастает при использовании «градиентных структур» параметры которых (например, намагниченность ФМ слоя или поляризация ПЭ слоя) изменяются по толщине структуры.

В этой связи особую актуальность приобретают теоретические и экспериментальные исследования особенностей МЭ явлений в неоднородных структурах с различными законами пространственного изменения параметров слоев. Требуется разработка новых моделей и методов расчета характеристик МЭ взаимодействий в таких структурах и экспериментальная проверка предсказаний теории, чему и посвящена представленная диссертационная работа. Новизна поставленных задач с научной точки зрения и важность ожидаемых результатов для решения практических задач и определяют *актуальность и своевременность диссертационной работы*.

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка использованных источников, изложена на 132 стр., включая 57 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 103 наименования. Первая обзорная глава посвящена описанию состояния теоретических и экспериментальных исследований в области магнитоэлектрических явлений в композитных структурах и в градиентных структурах в частности. В последующих трех главах изложены теоретические модели, результаты расчетов и экспериментальных исследований, полученных автором.

Научная новизна диссертационной работы определяется совокупностью новых научных результатов, изложенных в диссертации.

1. Построена модель низкочастотного МЭ эффекта в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах со ступенчатым изменением свойств материалов по толщине. Показано, что замена однородного магнитострикционного (пьезоэлектрического) слоя на два слоя с разными величинами пьезомагнитных (пьезоэлектрических) коэффициентов приводит к росту величины МЭ эффекта на низких частотах, что обусловлено изменением вклада изгибных деформаций и появлению дополнительных изгибающих моментов, действующих на структуру. Показано теоретически, что МЭ

коэффициент для слоистой структуры никель-пермендюр-пьезоэлектрик на ~60% выше, чем МЭ коэффициент для структур никель-пьезоэлектрик и пермендюр-ЦТС. Использование в структурах никель-пьезоэлектрик и пермендюр-пьезоэлектрик биморфного пьезоэлектрического преобразователя, вместо однородного пьезоэлектрического слоя, позволяет на 60 % увеличить МЭ коэффициент.

2. Построена модель МЭ эффекта в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах со ступенчатым изменением свойств материалов по толщине при возникновении в структуре электромеханического резонанса. Показано теоретически, что замена однородного магнитострикционного (пьезоэлектрического) слоя на два слоя с разными знаками пьезомагнитных (пьезоэлектрических) коэффициентов также приводит к дополнительному росту МЭ эффекта, что объяснено изменением изгибных деформаций и возникновением дополнительных изгибающих моментов в структуре. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтверждают предсказания теории.

3. Построена модель для расчета индуктивности композитной структуры ферромагнетик-пьезоэлектрик. Выполнены численные оценки величины индуктивности и степени перестройки индуктивности симметричной и асимметричных слоистых структур ферромагнетик-пьезоэлектрик при воздействии на них электрического поля. Эффект изменения индуктивности обнаружен и исследован экспериментально.

Практическая значимость работы состоит в разработанных автором методиках и программах для расчета МЭ характеристик слоистых композитных структур со ступенчатым изменением параметров слоев по толщине, что найдет применение при расчете параметров различных устройств, выполненных на основе таких структур. Перспективным для использования в электронных и радиотехнических системах представляется предложенный автором индуктивный элемент на основе структуры ферромагнетик-пьезоэлектрик, величину индуктивности которого можно плавно пере-

страивать электрическим полем. При условии достижения конкурентоспособных характеристик и отработки технологии изготовления, такие элементы могут найти широкое применение, например, в частотно-задающих системах.

Достоверность и обоснованность научных положений и полученных результатов исследований определяется следующими обстоятельствами:

- Использованием при построении моделей общепризнанных физических законов и допущений, учетом максимального числа действующих факторов;
- Использованием при расчетах хорошо себя зарекомендовавших методов математической физики;
- Качественным совпадением результатов расчетов, полученных с помощью разработанных моделей, с результатами экспериментальных исследований;
- Согласованием полученных результатов с результатами работ других авторов в условиях их применимости, а также количественной близостью результатов в тех случаях, когда такое сопоставление возможно.

В качестве недостатков и замечаний по диссертационной работе укажем следующие:

1. В диссертации ни при построении моделей, ни при расчетах не учтен пьезомагнитный коэффициент q_{21} , определяющий величину деформации магнитного (и пьезоэлектрического) слоя в направлении, перпендикулярном приложенному магнитному полю. Знак коэффициента q_{21} противоположен знаку основного коэффициента q_{31} , а величина может достигать ~30 % от q_{31} (коэффициент Пуассона). Это может приводить к уменьшению реальной величины наблюдаемого МЭ эффекта на те же ~30%.
2. В главе 2 приведены расчеты эффективности МЭ взаимодействия для неоднородных структур с ферромагнитными слоями из Ni и пермендюра, а эксперимент выполнен для структур со слоем из аморфного ферромагнетика Метглас, параметры которого сильно отличаются от параметров Ni и пермендюра. Какие-либо экспериментальные данные для структуры с неоднородным ферромагнитным слоем в диссертации отсутствуют. Поэтому ут-

верждать, что «теория хорошо согласуется с экспериментальными данными» некорректно.

3. В главе 4 приведены результаты расчета характеристик индуктивного элемента на основе структуры ферромагнетик-пьезоэлектрик, индуктивность которого перестраивается электрическим напряжением (рис. 4.3-4.6). На рис. 4.10 и рис. 4.11 приведены результаты экспериментальных исследований изготовленного макета устройства. Как следует из сравнения рисунков, предсказания теории и результаты измерений отличаются в $\sim 10-30$ раз для абсолютной величины индуктивности L и в ~ 20 раз для величины перестройки индуктивности $\Delta L/L$. Какого-либо убедительного объяснения такого несоответствия в работе не приведено. В данном случае говорить о том, что «в целом эксперимент успешно согласуется с теорией» (стр. 118) или что, «характер теоретической зависимостинаходится в хорошем соответствии с экспериментальными данными» (см. стр.119) также весьма проблематично.

4. В работе имеются опечатки и несоответствия. Например: в подписях к рисункам 2.11 и 2.12 отсутствует нумерация кривых; в научных положениях диссертации утверждается, что «использование двухслойной магнитной компоненты с разными знаками магнитострикции приводит к росту величины МЭ эффекта ...», а из данных расчета на рис. 2.10 и 2.11 следует совершенно противоположное и т.д.

Отмеченные недостатки и небрежности в оформлении несколько ухудшают впечатление от работы, но не снижают в целом оригинальности и научной ценности проведенных исследований.

Результаты диссертации опубликованы в 5 статьях в журналах, входящих в список ВАК, доложены на 6-ти российских и международных конференциях и защищены патентом. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

Результаты, выводы и рекомендации диссертационной работы могут быть использованы в организациях, занимающихся разработкой новых композитных магнитных и пьезоэлектрических материалов и устройств измери-

тельной и информационной техники, использующих магнитоэлектрические эффекты, таких как МИРЭА, ИРЭ РАН, Воронежский госуниверситет, ОКБ «Пьезотехника» (г. Ростов на Дону), ОАО НИИ «Элпа» (г. Зеленоград), и ряде других.

Учитывая изложенное, считаем, что диссертационная работа Беличевой К.В. представляет собой законченное научное исследование, посвященное актуальной тематике, содержащее целый ряд новых с научной точки зрения и важных для практики результатов. Работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении научных степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842. Соискатель, Беличева К.В., за исследование магнитоэлектрического эффекта в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах с неоднородными компонентами, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - «Физика конденсированного состояния».

Отзыв рассмотрен и одобрен после обсуждения диссертационной работы Беличевой К.В. на научном семинаре кафедры «Нанотехнологии» МИРЭА 17 мая 2016 г.

Отзыв составили:

Фетисов Юрий Константинович, д.ф.-м.н., проф.,
директор Научно образовательного центра
«Магнитоэлектрические материалы и устройства»

Гладышев Игорь Васильевич, к.ф.-м.н., доцент,
зам. заведующего кафедрой «Нанотехнологии»

Тел. 8 495 434 8665

E-mail: fetisov@mirea.ru; i_gladushev@mirea.ru

Адрес: МИРЭА, пр. Вернадского 78, 119454 Москва, Россия

