О Т З Ы В

официального оппонента о диссертационной работе Беличевой Ксении Валерьевны «Магнитоэлектрический эффект в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах с неоднородными компонентами», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Актуальность темы исследования.

Объектом исследований настоящей работы являются гетерогенные слоистые структуры с магнитоэлектрическим эффектом. Исследованию магнитоэлектрического (МЭ) эффекта в гетерогенных структурах в последнее время уделяется большое внимание, поскольку он может быть положен в основу создания принципиально новых устройств твердотельной электроники. Кроме этого магнитоэлектрические композиционные материалы, сочетающие пьезоэлектрические и магнитострикционные фазы, обеспечивают возможность для преобразования магнитного поля в напряжение. За счет этого можно повысить эффективность систем сбора механической энергии благодаря комбинированию в едином устройстве преобразователей различного типа. Таким образом, данная диссертация представляет, несомненно, большой как научный, так и практический интерес.

МЭ эффект хорошо изучен в гетероструктурах, состоящих из однородных по составу и свойствам слоев пьезо- и магнитоактивных материалов, однако исследований магнитоэлектрических композитов с градиентными свойствами недостаточно. В работе проведено теоретическое исследование прямого и обратного МЭ эффекта в гетероструктурах пьезо- и магнитоактивных слоев с градиентом характеристик. Разработано несколько моделей МЭ эффекта в низкочастотной области и в области электромеханического резонанса. Использование градиентных пьезо- или

магнитоактивных слоев является одним из способов увеличения МЭ отклика. Таким образом, моделирование и создание МЭ материалов на основе неоднородных компонентов на сегодняшний день является актуальной научной задачей.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

Все результаты теоретических исследований, полученные автором, находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными, что подтверждает обоснованность выбранных подходов при моделировании магнитоэлектрического отклика в гетероструктурах с неоднородными слоями.

Основные положения, выносимые на защиту, а также выводы и рекомендации, сделанные по главам, основаны на тщательном анализе литературных источников. Библиография включает значительную и основную часть публикаций в указанных областях.

Достоверность основных экспериментальных положений работы следует из правильного выбора материалов, а так же методики проведения экспериментальных измерений магнитоэлектрических свойств композитов, с использованием аттестованного высокоточного оборудования. Довольно убедительно выглядят результаты, приведенные в третьей и четвертой главах, по исследованию магнитоэлектрического отклика в гетероструктурах с неоднородными слоями, а также элементов функциональной электроники на их основе. Таким образом, можно сделать вывод, что все экспериментальные результаты, вынесенные на защиту, имеют высокую степень достоверности.

Научная новизна результатов.

Следующие результаты автор считает оригинальными:

1. Разработана теоретическая модель низкочастотного МЭ эффекта и получены приближенные выражения для низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению в магнитострикционно-пьезоэлектрических планарных структурах с градиентными по составу слоями.

2. Построена теоретическая модель МЭ эффекта и получены приближенные выражения для МЭ коэффициента по напряжению в области изгибной моды в магнитострикционно-пьезоэлектрических слоистых структурах на основе градиентных материалов.

3. Исследованы частотные зависимости МЭ коэффициента по напряжению для различных значений материальных параметров и геометрических размеров структур.

Действительно, все заявленные результаты являются оригинальными и позволяют расширить знания о магнитоэлектрических гетероструктурах с неоднородными по составу и свойствам слоями.

Значимость для практики результатов работы.

Практическая значимость работы, во-первых, объясняется проведенными теоретическими расчетами магнитоэлектрических структур со слоями, изготовленными из градиентных материалов. Результаты расчетов показывают перспективность конструирования подобных систем, а так же позволяют предсказывать свойства композитов на основе неоднородных материалов. Последнее позволит создать обратную связь между свойствами материалов и характеристиками разрабатываемых на их основе функциональных радиоэлектронных компонент (датчики переменного электромагнитного и постоянного магнитного полей, датчики тока, датчики мощности; СВЧ-устройства с электрическим управлением: модуляторы, переключатели, фильтры, фазовращатели и невзаимные устройства, индуктивный элемент на основе МЭ эффекта), что обеспечит целенаправленное развитие перечисленных отраслей электроники. Во-

вторых, стоит отдельно отметить предложенную схему управляемого индуктивного элемента. Данная рекомендация по использованию исследуемых слоистых структур является наглядным примером практического применения изучаемых соискателем гетероструктур. Предложенный элемент может быть использован для конструирования на его основе функциональных блоков радиопередающих и радиоприемных устройствах для настройки колебательных контуров на резонансную частоту.

Апробация результатов и публикации.

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 9 статьях, из них 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, получены 1 патент на полезную модель, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, а также опубликованы тезисы 2 докладов на Международных и Всероссийских научных конференциях. Содержание автореферата полностью отражает основные идеи, методы и результаты, полученные в диссертации.

Замечания по диссертационной работе

В данной части я остановлюсь на основных замечаниях к данной работе:

1. В тексте работы несколько раз используется не точное обозначение эффектов наблюдаемых в материалах. В частности на странице 47 и 63 упоминается, что *«магнитострикция проявляется в виде пьезомагнитного эффекта»*. Указанные эффекты являются противоположными по физической природе.
2. Автор работы утверждает, что приложение постоянного подмагничивающего поля может линеаризовать МЭ эффект, имея в виду линейный характер полевой зависимости магнитоэлектрического отклика. В связи с тем, что в основе прямого магнитоэлектрического эффекта лежит магнитострикция, то использование данного термина не считается подходящим, так как эффект линеаризации магнитострикции

заключается лишь в исчезновении удвоения частоты отклика по отношению к модулирующему магнитному полю.

3. При построении модели магнитоэлектрического отклика в гетероструктурах с градиентным ферромагнетиком автор заменяет индуцированное внутреннее магнитное поле приложением внешнего постоянного поля вдоль образца. Однако, согласно экспериментальным исследованиям зарубежных авторов наведенная намагниченность в градиентных ферромагнетиках направлена вдоль градиента магнитных свойств, т.е. перпендикулярно поверхности слоев. Целесообразнее является провести моделирование так называемый "поперечный" магнитоэлектрический эффект при взаимно перпендикулярной ориентации векторов напряженностей переменного и постоянного магнитных полей.
4. В экспериментальной части работы не приведены результаты аттестации основных свойств пьезо- и магнитоактивных слоев. Не указана методика получения исходных материалов.
5. При оценке погрешности измерений автор указал лишь разброс пьезомагнитного модуля. Однако при моделировании магнитоэлектрического отклика коэффициент механической связи брался идеальным, в то время как при изготовлении образцов почти невозможно обеспечить это условие. Поэтому считаю целесообразным провести оценку вклада от коэффициента механической связи между слоями.
6. При практическом использовании гетероструктур с неоднородными компонентами в качестве основы для изготовления элементов функциональной электроники возникает вопрос по поводу наблюдаемого в данных материалах гистерезиса магнитоэлектрического отклика. Каким образом на основе материала с неопределенностью свойств (из-за гистерезиса) возможно построить устройство или датчик, так как для одного значения поля будет соответствовать два возможных значения отклика?

Заключение.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы в целом. Работа производит хорошее впечатление, как своим высоким научным уровнем, так и оформлением. Представленная диссертационная работа представляет собой законченную научно-квалификационную работу.

Учитывая актуальность выполненных исследований, научную новизну, теоретическую и практическую значимость полученных результатов считаю, что представленная диссертационная работа «Магнитоэлектрический эффект в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах с неоднородными компонентами» выполнена в соответствии с критериями, установленными пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор - Беличева Ксения Валерьевна - заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

кандидат физико-математических наук,
эксперт научно-образовательного центра энергоэффективности,
НИТУ «МИСиС»

Карпенков Дмитрий Юрьевич

27 мая 2016 г.

Адрес: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д.4, НИТУ «МИСиС»
Научно-образовательный центр энергоэффективности
Телефон: +7 915 437 22 12
e-mail: Karpenkov_d_y@mail.ru

Проректор по науке и инновациям Филонов М.Р.