

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Масюгина Альберта Николаевича «Магнитоэлектрический эффект в пленках цериевого и висмутового феррита граната с редкоземельным замещением», по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Исследование новых многофункциональных материалов, обнаруживающих свойства мультиферроиков и сильную связь между магнитной, электронной и упругой подсистемами, проявляющуюся в виде магнитоэлектрических и магниторезистивных эффектов при комнатной температуре представляет интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Привлекательными являются мультиферроики с магнитооптическими эффектами.

Ранние исследования показали, что пленки железоиттриевого граната, с замещением иттрия висмутом, обнаруживают магнитоэлектрический (МЭ) и магнитооптический эффекты. На их основе созданы пространственные модуляторы света с высокой скоростью переключения и устройства для магнитооптической памяти на основе эффектов Фарадея и Керра. При этом в объемном висмутовом феррите гранате линейный магнитоэлектрический эффект отсутствует. Он существует в наноразмерных пленках (толщиной ~ 100 нм) в сильных магнитных полях в состоянии магнитного насыщения. Важным является обнаружение в таких объектах неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия, которое в магнитно-неоднородных системах приводит к возникновению несобственной электрической поляризации.

Целью диссертационной работы является установление механизмы магнитоэлектрического взаимодействия в пленках иттриевого феррит граната, с замещением ионов иттрия ионами висмута и церия, изготовленных на различных подложках (на стекле и на галлий гадолиниевом гранате (GGG)) в широком диапазоне температур от 80 К до температур выше комнатной. Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1. Влияние интерфейса на магнитодиэлектрические свойства пленок висмутового феррита граната;

2. Исследование роли неподеленной электронной пары  $6s^2$  на наружной оболочке ионов висмута в формировании магнитоэлектрического взаимодействия путем замещения в изучаемых объектах ионов висмута ионами церия;
3. Выяснение вклада упругости решетки в магнитоэлектрическое взаимодействие при исследовании магнитострикции и электрострикции в исследуемых пленках. В этой связи, научная значимость и актуальность представленной работы не вызывает сомнений.

В качестве конкретных объектов исследований в диссертационной работе были выбраны тонкие пленки  $Nd_1Bi_2Fe_5O_{12}/Nd_2Bi_1Fe_4Ga_1O_{12}$  на стеклянной подложке и  $Nd_{0.5}Bi_{2.5}Fe_5O_{12}$  на монокристаллической подложке GGG и поликристаллические пленки  $Ce_3Fe_5O_{12}$  также на подложке GGG. Поскольку ионы  $Bi^{3+}$ , благодаря наличию на наружной оболочке уединенных пар электронов  $6s^2$ , приводят к локальному искажению решетки, в то время как ионы  $Ce^{4+}$  не вызывают таких искажений решетки, выбор объектов для решения поставленной задачи представляется разумным. Он позволяет отчетливо выявить влияние ионов  $Bi^{3+}$  в формировании магнитоэлектрического взаимодействия и электрической поляризации.

Используемые в работе экспериментальные методы – это измерение констант электро- и магнитострикций от электрического и магнитного полей и от температуры; измерение емкости и тангенса угла потерь в области частот 20 Гц – 1 МГц в магнитных полях до 12 кЭ от частоты и температуры; измерение электрической поляризации от электрического поля в магнитных полях до 12 кЭ при различных ориентациях магнитного поля относительно пленки при фиксированных температурах; определение компонент магнитоэлектрического тензора в магнитном поле до 12 кЭ при различных ориентациях магнитного поля относительно пленки.

Диссертация построена по классической схеме. Во Введении обоснована актуальность темы, сформулированы ее цели и задачи, рассматривается объект и предмет исследований. Описаны методы исследования, научная новизна работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, научная и практическая значимость работы, достоверность результатов, указан личный вклад автора, аprobация работы на конференциях, поддержка работы грантами, количество публикаций, структура и объем диссертации.

В первой главе приведен обзор имеющихся литературных данных по изучаемым объектам. Рассмотрены микроскопические механизмы магнитоэлектрического

взаимодействия; структура и свойства феррит гранатов; особенности изучаемых материалов и методы их исследования.

В следующих трех главах приведены результаты экспериментальных исследований магнитоэлектрического эффекта, магнитострикции и электрострикции пленок висмутового феррита граната с редкоземельным замещением; электрической поляризации; теплового расширения; тока проводимости; оптическая и ИК спектроскопия, импеданс и емкость, ВАХ. Рассмотрены также магнитоэлектрический эффект, ИК спектроскопия и ВАХ в пленках  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ .

Отметим основные результаты, полученные при исследованиях пленок феррит-гранатов висмута и церия.

- В пленках феррита-граната висмута и разбавленных неодимом пленках обнаружены магнитоэлектрические эффекты и петли гистерезиса электрической поляризации, зависящие от интерфейса. Оказалось, что такие параметры пленок на подложках GGG были больше, чем для пленок на стекле. Обнаружены линейный и квадратичный по магнитному полю МЭ эффекты. Линейный отклик МЭ восприимчивости объясняется в модели, учитывающей спин-орбитальное взаимодействие; квадратичный МЭ эффект обусловлен обменно-стрикционным механизмом.
- В пленках феррита-граната висмута и разбавленных неодимом пленках определены температуры экстремальных значений коэффициентов теплового расширения пленок, которые не зависят от типа подложки, а обусловлены структурными деформациями пленок.
- При температурах ниже комнатной в этих пленках обнаружены отрицательные константы магнитострикции. Вблизи комнатной температуры наблюдается смена знака констант магнитострикции. Обнаружена корреляция температур максимумов магнитострикции и электрострикции с температурой максимума коэффициента теплового расширения.
- В пленках феррита граната висмута обнаружено увеличение емкости в магнитном поле, обусловленное МЭ взаимодействием.
- В поликристаллических пленках феррита граната висмута на стекле и монокристаллических пленках на GGG обнаружен гистерезис ВАХ, обусловленный гистерезисом электрической поляризации, который исчезает в поликристаллической пленке при более низкой температуре, чем в монокристаллической пленке.
- Пленки феррита граната церия  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  оказались параполикристаллами, обнаруживающими линейный и квадратичный МЭ эффект. Линейный МЭ эффект

объясняется в модели градиента деформации с полярным смещением ионов. Квадратичный же эффект обусловлен обменной магнитострикцией между ионами железа. ВАХ подчиняется закону Ома. Гистерезис отсутствует.

Приведенный набор экспериментальных результатов убедительно свидетельствует о том, что в пленках феррита-граната висмута и разбавленных неодимом пленках имеются линейный и квадратичный по магнитному полю МЭ эффекты, а также электрическая поляризация, обусловленная главным образом локальнымиискажениями решетки вблизи ионов  $\text{Bi}^{3+}$ , которые обладают неподеленной электронной парой  $6s^2$  на наружных оболочках. Этот результат, на мой взгляд, является основным физическим результатом представленной диссертации.

У меня возникает вопрос по физике влияния магнитного поля на электрическую поляризацию при различных температурах по нормали к монокристаллической висмутовой пленке на подложке из GGG и поликристаллической пленке на стекле. Эти зависимости хорошо описываются предложенными моделями магнитоиндукционной электрической поляризации в мультиферроиках для обеих типов кристаллов, но качественно отличаются между собой, особенно при низких температурах. Это наводит на мысль, что в пленках на подложке GGG усилен магнитный момент по сравнению с пленкой на стекле за счет диффузии сильно магнитных ионов  $\text{Gd}^{3+}$  при изготовлении пленки. Т.е. подложка GGG является активной.

Диссертация производит хорошее впечатление, логично построена, хотя и содержит несколько повышенный уровень опечаток и несогласований падежей.

Все полученные в диссертации результаты являются новыми и интересными, выводы и защищаемые положения обоснованы. Не сомневаюсь, что они будут востребованы научным сообществом. Уровень проведенных исследований высокий, что демонстрирует высокую квалификацию автора. Основные результаты работы опубликованы в рейтинговых журналах, доложены на международных и российских конференциях. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация Масюгина Альберта Николаевича «Магнитоэлектрический эффект в пленках цериевого и висмутового феррита граната с редкоземельным замещением» полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук и соответствует п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. - «Физика конденсированного состояния».

## ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ

Санина Виктория Александровна, доктор физико-математических наук,  
Главный научный сотрудник Лаборатории физики сегнетоэлектричества и магнетизма,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
14 сентября 2021 г.

D.D. 7 per

#### **Контактные данные:**

Почтовый адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Телефон: +7 921 774 40 78

Электронная почта: sanina@mail.ioffe.ru



## СПИСОК

избранных публикаций официального оппонента д.ф.-м.н. В.А. Саниной за 2017-2021 г.г. по теме диссертации А.Н. Масюгина «Магнитоэлектрический эффект в пленках цериевого и висмутового феррита граната с редкоземельным замещением»

1. Khannanov B. Kh.; Sanina V.A.; Golovenchits E.I.; Scheglov M.P.; Electric polarization induced by phase separation in magnetically ordered and paramagnetic states of RMn<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (R=Gd, Bi); 2017, J. Magn. Magn. Mater.; v. 421, 326-335.
2. Санина В.А.; Ханнанов Б.Х.; Головенчиц Е.И.; Магнитная динамика областей фазового расслоения в мультиферроиках GdMn<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и Gd<sub>0.8</sub>Ce<sub>0.2</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 2017, ФТТ, т. 59, 1932-1939.
3. Санина В.А.; Ханнанов Б.Х.; Головенчиц Е.И.; Щеглов М.П.; Замороженное суперпараэлектрическое состояние локальных полярных областей в GdMn<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и Gd<sub>0.8</sub>Ce<sub>0.2</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 2018, ФТТ, т. 60, 531 – 542.
4. Санина В.А.; Ханнанов Б.Х.; Головенчиц Е.И.; Щеглов М.П.; Электрическая поляризация в YCrO<sub>3</sub>, индуцированная локальными полярными областями магнитной и структурной природы; 2019, ФТТ, т. 61, 95-103.
5. Санина В.А.; Ханнанов Б.Х.; Головенчиц Е.И.; Щеглов М.П.; Электрическая поляризация в ErCrO<sub>3</sub>, индуцированная локальными полярными областями; 2019, ФТТ, т. 61, 501-509.
6. Головенчиц Е.И.; Ханнанов Б.Х.; Санина В.А.; Влияние оптической накачки и магнитного поля на состояния областей фазового расслоения в Eu<sub>0.8</sub>Ce<sub>0.2</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 2020, Письма в ЖЭТФ, т. 111, 12, 826-832.
7. Ханнанов Б.Х.; Головенчиц Е.И.; Санина В.А.; Влияние редкоземельных ионов на электрическую поляризацию, индуцированную областями фазового расслоения в RMn<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (R= Er, Tb); 2020, ФТТ, т. 62, 257 – 266.
8. Ханнанов Б.Х.; Головенчиц Е.И.; Санина В.А.; Фruстрация обменно-стрикционного сегнетоэлектрического упорядочения и рост электрической поляризации областей фазового расслоения в твердых растворах R<sub>0.8</sub>Ce<sub>0.2</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Er, Tb); 2020, ФТТ, т. 62, 574-583.
9. Ханнанов Б.Х.; Залесский В.Г.; Головенчиц Е.И.; Санина В.А.; Смирнова Т.А.; Щеглов М.П.; Боков В.А.; Лушников С.Г.; Разделение фаз и зарядовые состояния в релаксорном сегнетоэлектрике PbCo<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>O<sub>3</sub>; 2020, ЖЭТФ, т. 157, 3, 523-531.
10. Sanina V.A Khannanov B. Kh.; Golovenchits E.I.; Optical control of superlattices states formed due to electronic phase separation in multiferroic in Eu<sub>0.8</sub>Ce<sub>0.2</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 2021, Nanomaterials, v. 11, 7 ArtNo: #1664.

11.Ханнанов Б.Х.; Санина В.А.; Головенчиц Е.И.; Лушников С.Г.; Фазовые переходы и фазовые превращения в нанообластях фазового расслоения в мультиферроике  $\text{ErMn}_2\text{O}_5$ ; 2021, ФТТ, 63, 11, 1863-1873.

Официальный оппонент, главный научный сотрудник лаборатории физики сегнетоэлектричества и магнетизма Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН», доктор физико-математических наук (01.04.07 – Физика конденсированного состояния) Санина Виктория Александровна; Телефон +7(921) 774-40-78; E-mail: sanina@mail.ioffe.ru.

*Д.Р. Санина*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН» Адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26; Телефон: (812) 297-2245; Факс: (812) 297-1017; Электронная почта: post@mail.ioffe.ru.

Подпись доктора физико-математических наук, гл. н. сотр. Саниной В.А. удостоверяю:

*Ученой секретаря  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе* *М.Н. Баров М.Н.*

