

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
*Федеральное государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования*
«Дагестанский государственный университет»



На правах рукописи

Абдулвахидов Башир Камалудинович

Фазовые переходы, динамика решетки и электрофизические свойства

PbMnVO_3 (В - Nb, Ta) и CoFe_2O_4 в композиции с PbTiO_3

2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Махачкала

2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Дагестанский государственный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Садыков Садык Абдулмуталибович, заведующий кафедрой (федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дагестанский государственный университет»)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук (специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния), профессор Коротков Леонид Николаевич, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный технический университет";

кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния) Алиев Ахмед Магомедович, ведущий научный сотрудник Лаборатории физики низких температур и магнетизма Института физики им. Х. И. Амирханова – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Дагестанского федерального исследовательского центра Российской академии наук.

Защита диссертации состоится **«05» сентября 2025 г. в 14.00 часов** на заседании диссертационного совета **ЮФУ801.01.04** по физико-математическим наукам (специальность **2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы**) при Южном федеральном университете в здании Центра наукоемкого приборостроения ЮФУ по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 26Б.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ЮФУ имени Ю.Ф. Жданова по адресу: г. Ростов/Дону, ул. Зорге, 21Ж и на <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1345245/>

Автореферат разослан «__» _____ 2025 года

Отзыв на автореферат (с указанием даты, а также полных фамилии, имени, отчества, ученой степени со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail) с заверенной подписью рецензента и печатью учреждения просим направлять в 2 экз. учёному секретарю диссертационного совета ЮФУ801.01.04 при ЮФУ по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. А. Сладкова, 178.24 МИИ ИМ ЮФУ, а также в формате *pdf* на e-mail: lguda@sfedu.ru.

Учёный секретарь
диссертационного совета
ЮФУ810.01.04, к. ф.-м. н.

Гуда Любовь Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Целенаправленный поиск новых сегнетоэлектрических (СЭ) и ферромагнитных соединений (ФМ), обладающих полифункциональными свойствами, и их экспериментальное изучение привело к развитию физики магнитных и СЭ явлений, расширению числа СЭ и ФМ, а также к различным вариациям методов и технологий получения этих материалов. В 1958 г. Смоленским Г.А. с сотрудниками был открыт ряд сегнетоэлектриков, представляющих собой сегнетоэлектрики-антиферромагнетики со структурой типа перовскита [1]. С теоретической и прикладной точки зрения интерес к этим составам был обусловлен прежде всего тем, что было обнаружено взаимное влияние магнитных и сегнетоэлектрических подсистем, а это открывало возможность их практического применения в функциональных устройствах.

Среди составов, обладающих сегнетоэлектрическими и магнитными свойствами, малоизученными остаются такие составы, как $\text{PbMn}_{0.33}\text{Nb}_{0.66}\text{O}_3$ (далее РМnN) и $\text{PbMn}_{0.33}\text{Ta}_{0.66}\text{O}_3$ (далее РМnТ) и твердые растворы на основе каждого из них в композиции PbTiO_3 (далее РМnN-РТО и РМnТ-РТО), что обусловлено сложностью их получения без примесных фаз. Наличие в составах РМnN и РМnТ ионов марганца Mn, обладающих магнитным моментом, и сегнетоактивных ионов ниобия Nb^{5+} и тантала Ta^{5+} делает эти два состава претендентами на соответствующие места среди ферроупорядоченных веществ, обладающих релаксорным поведением поляризации, а введение РТО в качестве дополнительной компоненты позволит варьировать параметры их физических свойств.

Другими интересными объектами для изучения как с теоретической, так и с практической точек зрения, являются композиты $(1-x)(\text{CoFe}_2\text{O}_4)-x\text{PbTiO}_3$ (далее CFO-РТО), представляющие собой гетерогенные системы, состоящие из двух компонентов, отличающихся по химическому составу, физическим свойствам и разделённых в материале чётко выраженной границей. Принято считать, что в них структурные

элементы не смешиваются на атомном уровне. Им характерны такие физические свойства, которыми не обладает каждая компонента в отдельности. CoFe_2O_4 (далее CFO) представляет собой обращенную ферритовую шпинель с высокой диэлектрической проницаемостью и высоким удельным электрическим сопротивлением в сочетании с достаточно высоким значением магнитной проницаемости и отрицательной магнитострикции; индукция насыщения CFO меньше, чем у металлических магнитных материалов, что создает условие для его применения на высоких частотах при малых индукциях. Согласно [2], при совместном синтезе CoFe_2O_4 и PbTiO_3 итоговый состав не всегда является композитом в классическом понимании, но детально этот вопрос в работе [2] не изучен.

Данная работа частично выполнена на кафедре физики конденсированного состояния и наносистем ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет» при поддержке государственного задания (проект № FZTZ-2025-0003).

Степень разработанности темы исследования. Несмотря на большой интерес исследователей к PMnN-PTO , PMnT-PTO и CFO-PTO , публикации по наноструктурированным методом «сверху-вниз» композитам отсутствуют, детальный анализ структуры и многих физических свойств не проведен, не изучено влияние структурных дефектов на их физические свойства. Существующий пробел в изучении физических свойств PMnN-PTO , PMnT-PTO и CFO-PTO и совокупность полезных свойств этих составов являлись мотивацией для комплексного изучения их структуры и физических свойств.

Таким образом, диссертация посвящена **актуальной проблеме** одной из ветвей физики конденсированного состояния, а именно – физического материаловедения, – получению и установлению связи между структурой и свойствами составов PMnN-PTO , PMnT-PTO и CFO-PTO как макроскопического, так и нанометрового масштабов.

Целями данной работы являлись:

- оптимизация условий получения твердофазным методом PMnN , PMnT , CFO и сложных составов на их основе в композиции PTO ;
- исследование их физических свойств в широком интервале температур и магнитных полей для выявления взаимного воздействия сегнетоэлектрических и магнитных подрешеток;
- установление связи между структурой и их физическими свойствами
- изучение размерного эффекта PMnN , PMnT и CFO ;
- изучение размерного эффекта PMnN-PTO , PMnT-PTO и CFO-PTO .

Научная новизна. В диссертационной работе впервые:

1. Оптимизирована методика получения беспримесных твердых растворов $\text{PbMn}_{0.33}\text{Nb}_{0.66}\text{O}_3$.
2. Исследовано формирование целевых свойств путем «разбавления» $\text{PbMn}_{0.33}\text{Nb}_{0.66}\text{O}_3$ и $\text{PbMn}_{0.33}\text{Ta}_{0.66}\text{O}_3$ классическим сегнетоэлектриком PbTiO_3 .
3. Установлена область морфотропного фазового перехода твердых растворов $(1-x)\text{PbMn}_{0.33}\text{Nb}_{0.66}\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$.
4. Изучены диэлектрические и транспортные свойства и структурные параметры $(1-x)\text{PbMn}_{0.33}\text{Nb}_{0.66}\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$, $(1-x)\text{PbMn}_{0.33}\text{Ta}_{0.66}\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ и $(1-x)\text{CoFe}_2\text{O}_4-x\text{PbTiO}_3$.
5. Показано, что совместное твердофазное спекание CoFe_2O_4 и PbTiO_3 сопровождается образованием дополнительных фаз: гексаферрита свинца $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$, композита $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-PbTiO}_3$ и дефектных твердых растворов.
6. Установлена связь динамики кристаллической решетки с размерностью и структурным совершенством составов.

Научная и практическая значимость определяются тем, что полученные результаты развивают и дополняют представления о структурных изменениях в процессе синтеза мультиферроиков – шпинелевых ферритов в композиции с сегнетоэлектриками, фазовых переходах в сегнетомагнетиках-

сегнетоэлектриках, а также могут быть использованы для оптимизации технологии их получения.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. При комнатной температуре симметрия твердого раствора $\text{PbMn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ описывается пространственной группой $R3m$ и сохраняется после наноструктурирования под давлением 1 ГПа. В концентрационном интервале $0.15 \leq x \leq 0.25$ твердый раствор $(1-x)\text{PbMn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ соответствует морфотропной области, граничащей с областями ромбоэдрической $R3m$ и тетрагональной сингонии $R4mm$.
2. Рассеяние носителей заряда на аморфных границах зерен наноструктурированных CoFe_2O_4 и композитов $(1-x)\text{CoFe}_2\text{O}_4-x\text{PbTiO}_3$ с концентрацией $x > 0.2$ обуславливает рост реальной части импеданса $\rho'(\omega)$ и сдвиг максимума мнимой части импеданса $\rho''(\omega)$ в область низких частот (10-100 Гц) из-за того, что сопротивление межзеренных границ R_{gb} [превышает сопротивление объема зерен R_b].
3. Наноструктурирование макроскопических твердых растворов $(1-x)\text{PbMn}_{0.33}\text{Nb}_{0.66}\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ приводит к увеличению ширины запрещенной зоны E_g в области морфотропного фазового перехода для концентрации $x = 0.2$ до максимальной величины, равной 3.58 эВ, по сравнению с макроскопическим состоянием, имеющим ширину запрещенной зоны E_g , равную 3.10 эВ; эта тенденция сохраняется при наноструктурировании составов $(1-x)\text{CoFe}_2\text{O}_4-x\text{PbTiO}_3$, и меняется на обратную для составов $(1-x)\text{PbMn}_{0.33}\text{Ta}_{0.66}\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$.

Личный вклад автора. Выбор научной темы, постановка и решение задач, обсуждение полученных результатов проводились автором совместно с научным руководителем. Все основные научные результаты получены лично автором. Соавторами научных публикаций являются Садыков С. А., Сирота М. А., Солдатов А. В., Будник А. П., Ластовина Т. А., Дмитренко И. П., Мардасова И. В., Витченко М. А., Каллаев С. Н., Омаров З., Абдулвахидов К. Г. и Ли Чжэню.

Апробация основных результатов диссертации

1. **L Школа ПИЯФ** по физике конденсированного состояния. ФКС-16, Санкт-Петербург, 14.03.2016 г.;
2. **LI Школа ПИЯФ** по физике конденсированного состояния ФКС-2017 11–16 марта 2017 г., Санкт-Петербург;
3. **International Conference** on «Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications» Jabalpur, India, October 14-16, 2017;
4. **Всероссийская конференция** с международным участием «Химия твердого тела и функциональные материалы – 2018» 12-й Всероссийский симпозиум с международным участием «Термодинамика и материаловедение», Санкт-Петербург, 20-27 мая 2018 г.;
5. **Международная конференция RPS-24** «Релаксационные явления в твердых телах», г. Воронеж, 13-18 сентября 2019 г.;
6. **III Международная конференция** «Тенденции развития физики конденсированных сред», Фергана, 2023 г..

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 7 тезисах и 7 статьях в рецензируемых журналах, список которых приведен в конце автореферата.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 194 страниц, в том числе 72 рисунка, 5 приложений, 20 таблиц, 19 страниц списка литературы и 3 страницы списка авторских публикаций, обозначенных литерой А.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы основные цели, задачи работы, научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор литературы по трем классам составных частей ферроупорядоченных систем, даны определения и описаны эмпирические признаки их разделения по классам. Акцентировано внимание на структурных особенностях и физических свойствах классических СМ, мультиферроиков, а также шпинелевых композитов.

Вторая глава посвящена описанию методики получения образцов, измерительной аппаратуре, методике проведения измерений, электронной микроскопии и рентгеноспектральной характеристики керамических образцов и их наноструктурированию.

Третья глава посвящена изучению кристаллической структуры составов $(1-x)\text{PMnN}-x\text{PbTiO}_3$, $(1-x)\text{PMnT}-x\text{PbTiO}_3$ и $(1-x)\text{CFO}-x\text{PbTiO}_3$ макро- и наномасштабов рентгенодифрактометрическим методом. На рисунке 1 приведены дифрактограммы PMnN и $0.8\text{PMnN}-0.2\text{PbTiO}_3$ и параметры решетки всех концентраций до и после наноструктурирования.

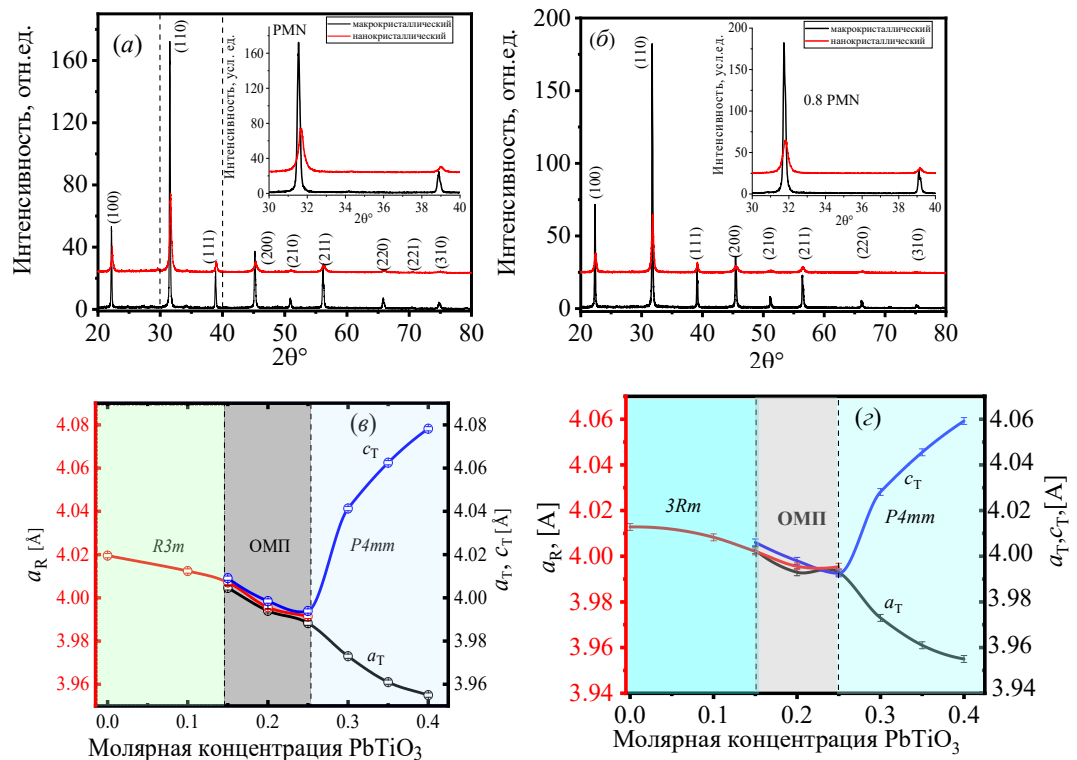


Рисунок 1 – Дифрактограммы PMnN (а), $0.8\text{PMnN}-0.2\text{PbTiO}_3$ (б) до и после наноструктурирования и концентрационная зависимость параметров решетки $(1-x)\text{PMnN}-x\text{PbTiO}_3$ до (в) и после наноструктурирования (г)

Анализ дифрактограмм после наноструктурирования показывает уширение и сдвиг брэгговских пиков по шкале углов вправо. Результаты оценки размеров областей когерентного рассеяния (D), микродеформаций ζ и плотности ρ_D для избранных кристаллографических направлений для трех составов $(1-x)\text{PbMnN-xPbTiO}_3$ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Размеры D , величины ζ и ρ_D $(1-x)\text{PbMn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3\text{-xPbTiO}_3$

До наноструктурирования			
Параметр	$0.8\text{PbMn}_{0.33}\text{Nb}_{0.66}\text{O}_3\text{-}0.2\text{PbTiO}_3$	$0.75\text{PbMn}_{0.33}\text{Nb}_{0.66}\text{O}_3\text{-}0.25\text{PbTiO}_3$	$\text{PbMn}_{0.33}\text{Nb}_{0.66}\text{O}_3$
D (перовскит), нм	(110) и (211) 56 и 37	(110) и (211) 40 и 26	(110) и (211) 53 и 34
ζ (перовскит)	$6.5 \cdot 10^{-4}$ и $9.7 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$ и $1.3 \cdot 10^{-3}$	$6.8 \cdot 10^{-4}$ и $1.0 \cdot 10^{-3}$
ρ_D , см ⁻²	$9.5 \cdot 10^{10}$	$1.8 \cdot 10^{11}$	$1.0 \cdot 10^{11}$
После наноструктурирования			
D (перовскит), нм	(110) и (211) 27 и 21	(110) и (211) 23.5 и 22	(110) и (211) 28 и 18
ζ (перовскит)	$1.3 \cdot 10^{-3}$ и $1.7 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$ и $1.6 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$ и $1.9 \cdot 10^{-3}$
ρ_D , см ⁻²	$4.1 \cdot 10^{11}$	$4.3 \cdot 10^{11}$	$3.8 \cdot 10^{11}$

На основе анализа рентгеноструктурных данных сформулировано *первое* научное положение, выносимое на защиту.

Далее для $(1-x)\text{PbMn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3\text{-xPbTiO}_3$ нами были получены аналогичные дифрактограммы всех композиций, две из которых приведены на рисунке 2. Отличительной особенностью стартового РМnТ от РМnN является уменьшение параметров решетки стартового РМnТ после наноструктурирования, в то время, когда параметры элементарных ячеек сложных композиций $(1-x)\text{PbMn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3\text{-xPbTiO}_3$ увеличиваются после наноструктурирования (рисунок 2 (β , γ)). Стоит также отметить, что процесс синтеза РМnТ сопровождался образованием дополнительной пироклорной фазы PbTa_2O_6 , его параметр ячейки также увеличивается после наноструктурирования. В таблице 2 приведены D и ζ четырех составов $(1-x)\text{PbMn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3\text{-xPbTiO}_3$ до и после наноструктурирования перовскитовой и пироклорной фаз для двух отражений в каждом случае. После

наноструктурирования D уменьшается, а ζ увеличивается, за исключением РМТ, для которого микродеформации практически одного порядка.

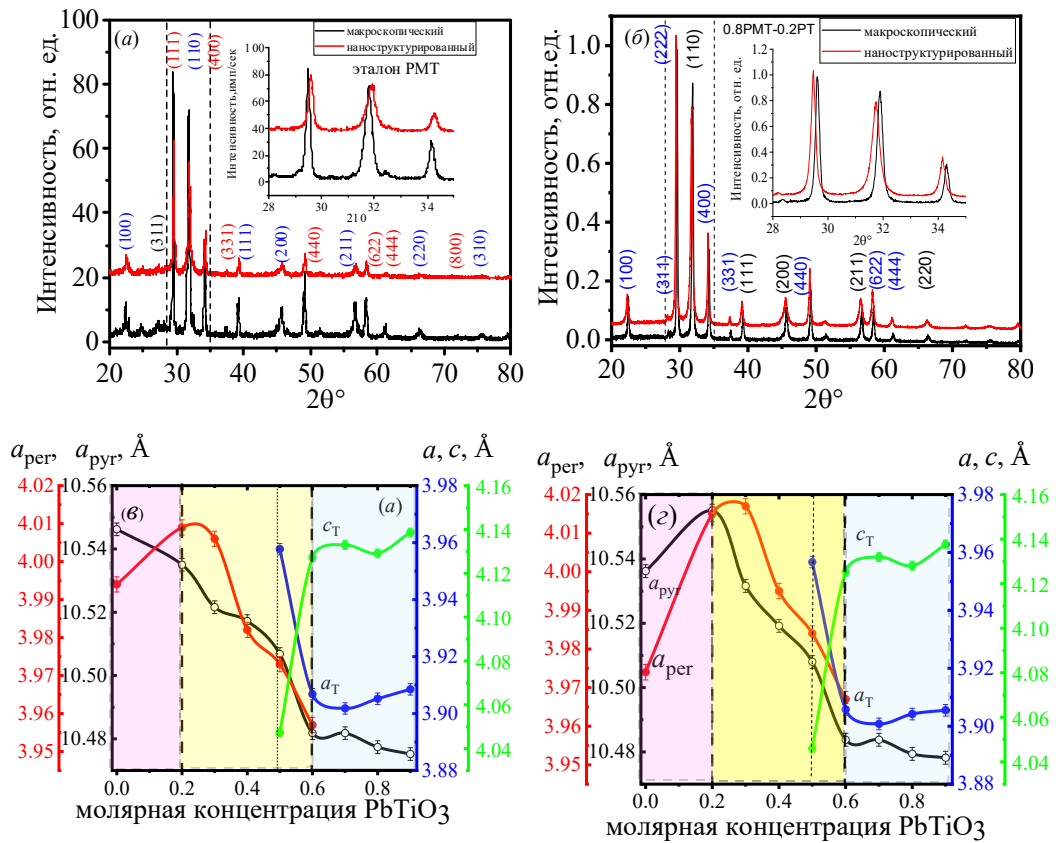


Рисунок 2 – Дифрактограммы РМnТ (а), 0.8РМnТ-0.2РТО (б) до и после наноструктурирования и концентрационная зависимость параметров решетки $(1-x)$ РМnN- x РТО до (а) и после наноструктурирования (б)

Таблица 2 – Размеры D и величины ζ $(1-x)$ РbMn $_{1/3}$ Ta $_{2/3}$ O $_3$ - x РbTiO $_3$ до и после наноструктурирования

До наноструктурирования				
Параметр	0.7РМТ- 0.3 РТО	0.75РМТ- 0.25 РТО	0.8РМТ - 0.2 РТО	РМТ
D (перовскит), нм. (пирохлор)	(110) и (111) 28 и 39 (400) и (440) 47 и 39	(110) и (111) 28 и 39 (400) и (440) 46 и 37	(110) и (111) 38 и 35 (400) и (440) 46 и 37	(110) и (111) 28 и 34 (400) и (440) 71 и 43
ζ (перовскит) (пирохлор)	$1.3 \cdot 10^{-3}$ и $9 \cdot 10^{-4}$ $7.6 \cdot 10^{-4}$ и $9.0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$ и $9 \cdot 10^{-4}$ $7.8 \cdot 10^{-4}$ и $9.9 \cdot 10^{-4}$	$9,6 \cdot 10^{-4}$ и $1 \cdot 10^{-3}$ $7.7 \cdot 10^{-4}$ и $9.6 \cdot 10^{-4}$	$1.28 \cdot 10^{-3}$ и $1.05 \cdot 10^{-3}$ $5 \cdot 10^{-4}$ и $8.4 \cdot 10^{-4}$
После наноструктурирования				
D (перовскит), нм. (пирохлор)	(110) и (111) 18 и 32 (400) и (440) 35 и 32	(110) и (111) 22 и 34 (400) и (440) 42 и 32	(110) и (111) 27 и 26 (400) и (440) 39 и 32	(110) и (111) 23.5 и 37.5 (400) и (440) 34 и 32
ζ (перовскит) (пирохлор)	$1.9 \cdot 10^{-3}$ и $1.1 \cdot 10^{-3}$ $1.0 \cdot 10^{-3}$ и $1.1 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$ и $1 \cdot 10^{-3}$ $3.4 \cdot 10^{-4}$ и $1.1 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$ и $1,3 \cdot 10^{-3}$ $9.2 \cdot 10^{-4}$ и $1.1 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$ и $9.6 \cdot 10^{-4}$ $1.0 \cdot 10^{-3}$ и $1.1 \cdot 10^{-3}$

Далее в диссертации рассмотрены структурные особенности и фазовое состояние составов $(1-x)\text{CoFe}_2\text{O}_4-x\text{PbTiO}_3$. Из результатов обработки рентгеновских дифрактограмм методом полнопрофильного анализа Ритвелда были получены параметры элементарных ячеек CFO, PTO и PFO композитов до и после наноструктурирования. Молярные зависимости этих параметров приведены на рисунке 3.

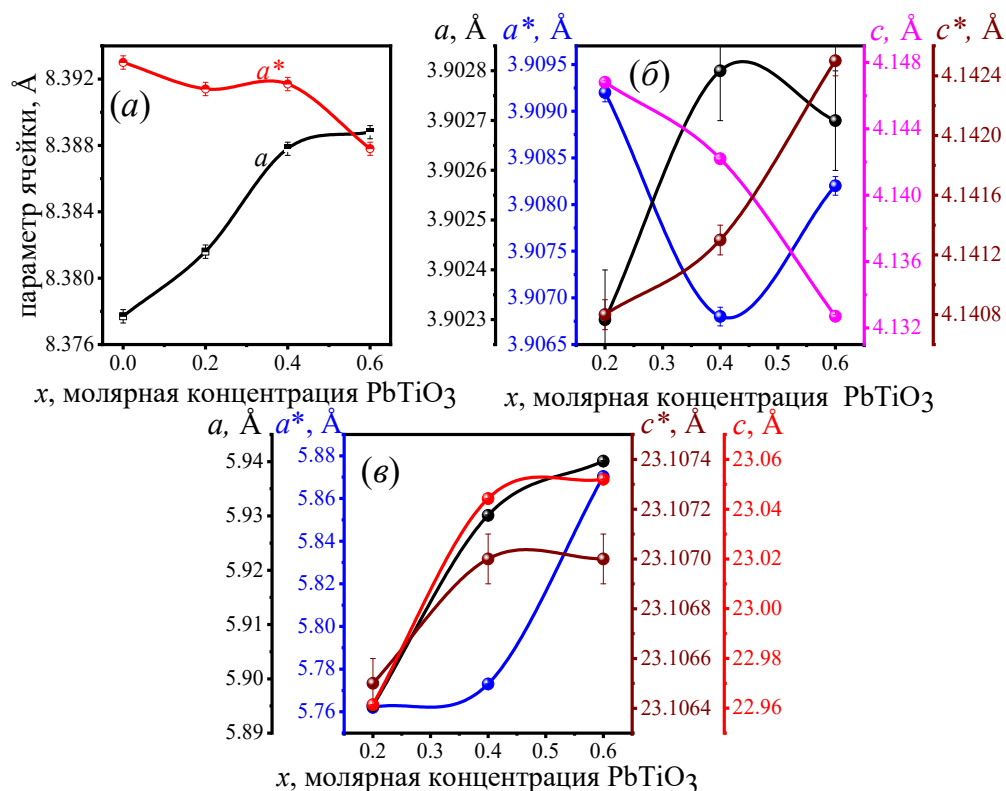


Рисунок 3 – Молярные зависимости параметров элементарных ячеек компонентов: CoFe_2O_4 (a), PbTiO_3 (б), $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ (в). Параметры после наноструктурирования отмечены звездочкой

Как видно из рисунка 3(a), параметр a CFO с ростом x растет, a^* уменьшается независимо от x . Параметр c PTO уменьшается с ростом x , а с увеличением x до 0.4 a растет, далее он уменьшается. Точка $x = 0.4$ интересна тем, что в этой точке наблюдаются минимум a^* и максимум a . Параметр c^* растет во всем концентрационном интервале. Сравнение c и c^* показывает, что максимальное изменение c в концентрационном интервале x составляет $\Delta c = 0.016 \text{ \AA}$, в то время, когда изменение c^* равно $\Delta c^* = 0.0016 \text{ \AA}$, и его абсолютное значение растет после механоактивации, что обусловлено структурными

дефектами, сгенерированными в процессе наноструктурирования. Скачок a PFO в точке $x = 0.6$ составляет $\Delta a = 0.045 \text{ \AA}$, а после наноструктурирования в этой же точке Δa равно 0.12 \AA . В то же время изменение c^* практически близко к погрешности измерения. Таким образом можно сделать вывод о том, что при механическом силовом воздействии элементарная ячейка PFO расширяется в плоскости, перпендикулярной оси симметрии 6-го порядка. Далее оценены D и ζ этих составов, результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Размеры областей когерентного рассеяния D и микродеформации ζ компонент составов $(1-x)\text{CFO}-x\text{PFO}$

Состав- давление	D , нм				Z			
	$x = 0.0$	$x = 0.2$	$x = 0.4$	$x = 0.6$	$x = 0.0$	$x = 0.2$	$x = 0.4$	$x = 0.6$
CFO	56	54.3	43	64.7	4.8×10^{-4}	5×10^{-4}	4.8×10^{-5}	7.2×10^{-4}
CFO – 1 GPa	6.8	15	18	26	2.1×10^{-3}	1.7×10^{-3}	1.4×10^{-3}	1.2×10^{-3}
PFO	-	39	37	39	-	7×10^{-4}	4.8×10^{-4}	9.6×10^{-4}
PFO – 1 GPa	-	6.5	20	9.8	-	7.6×10^{-4}	9.6×10^{-4}	2.5×10^{-3}
PFO	-	52	49	49	-	7.2×10^{-4}	3.3×10^{-4}	4×10^{-4}
PFO – 1 GPa	-	9.4	26	15.7	-	2.2×10^{-3}	1.3×10^{-3}	1.7×10^{-3}

После наноструктурирования, как и ожидалось, значение D уменьшается, в то время как плотность дислокаций ρ_D увеличивается для всех концентраций. Обнаружено, что плотность композиций $(1-x)\text{CFO}-x\text{PFO}$ изменяется немонотонно после наноструктурирования, в то время как пористость значительно уменьшается. Неравномерное изменение плотности может быть связано с неконтролируемостью концентрации фазы PFO, которая образуется в процессе синтеза композита [3].

Четвертая глава посвящена изучению физических свойств составов $(1-x)\text{PMnN}-x\text{PFO}$, $(1-x)\text{PMnTO}-x\text{PFO}$ и $(1-x)\text{CFO}-x\text{PFO}$, сопровождающихся диссипацией электрической энергии. В начале главы представлены результаты изучения диэлектрических свойств $(1-x)\text{PMnN}-x\text{PFO}$ на различных частотах. Обнаружено, что с увеличением x релаксационное поведение подавляется, и на

зависимости действительной части диэлектрической проницаемости $\varepsilon'(T)$ при высоких температурах появляется дополнительный максимум, соответствующий тетрагональной фазе. Также изменяется температура максимума диэлектрической проницаемости T_m , постоянная Кюри-Вейсса C и характер ФП от релаксороподобного к СЭ состоянию (рисунок 4). Соответствующие результаты приведены в таблице 4.

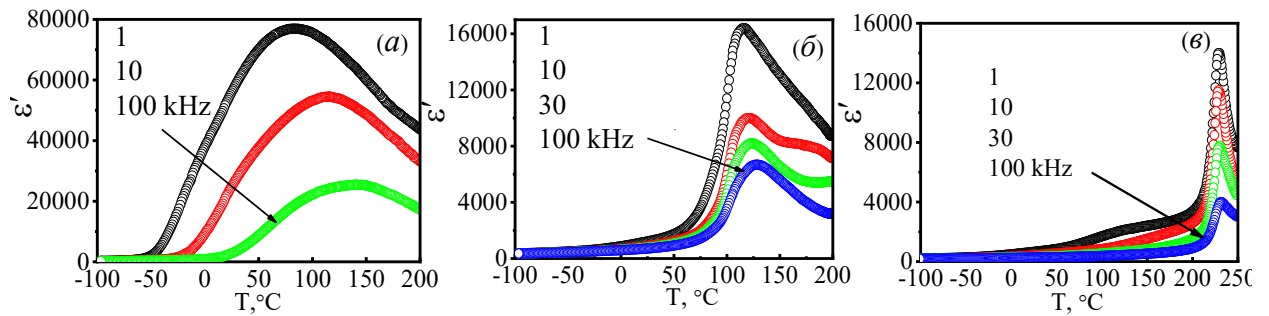


Рисунок 4 – Частотно-температурные зависимости ε' составов $(1-x)\text{PMnN}-x\text{PTO}$: (а) $x = 0$, (б) $x = 0.3$, (в) $x = 0.4$

Таблица 4 – Зависимости температуры фазового перехода T_m , разности температур $T_m - T_{c-w}$ и постоянной Кюри-Вейсса C_{c-w} $(1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x(\text{PbTiO}_3)$ от концентрации PbTiO_3

Состав	$T_m, ^\circ\text{C}$	$T_m - T_{c-w}, ^\circ\text{C}$	$C_{c-w} \times 10^5, ^\circ\text{C}$
$\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$	82	2	27,4
$0.9\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.1 \text{PbTiO}_3$	86	3	22,9
$0.85\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.15 \text{PbTiO}_3$	95	7	18,3
$0.8\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.2 \text{PbTiO}_3$	101	15	16
$0.75\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.25 \text{PbTiO}_3$	110	19	12,7
$0.7\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.3 \text{PbTiO}_3$	115	23	10,8
$0.65\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.35 \text{PbTiO}_3$	190	25	2,87
$0.6\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.4 \text{PbTiO}_3$	229	28	2,38

Аналогичные измерения проведены и для состава $(1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3-x(\text{PbTiO}_3)$. Для всех составов одновременно с ε измерен и $\text{tg } \delta$. Далее в диссертации представлены результаты изучения поведения $\varepsilon^*(\omega)$ и электрического модуля $M^*(\omega)$ керамик $(1-x)\text{CFO}-x\text{PTO}$ в широком интервале температур. На рисунке 5 (а – д) представлены зависимости $\varepsilon'(T, \omega)$ и мнимой части модуля $M''(\omega)$ от действительной части $M'(\omega)$. Для них можно выделить две температурные области: первая представляет область с явно

выраженным релаксационным поведением Максвелл-Вагнеровской поляризации.

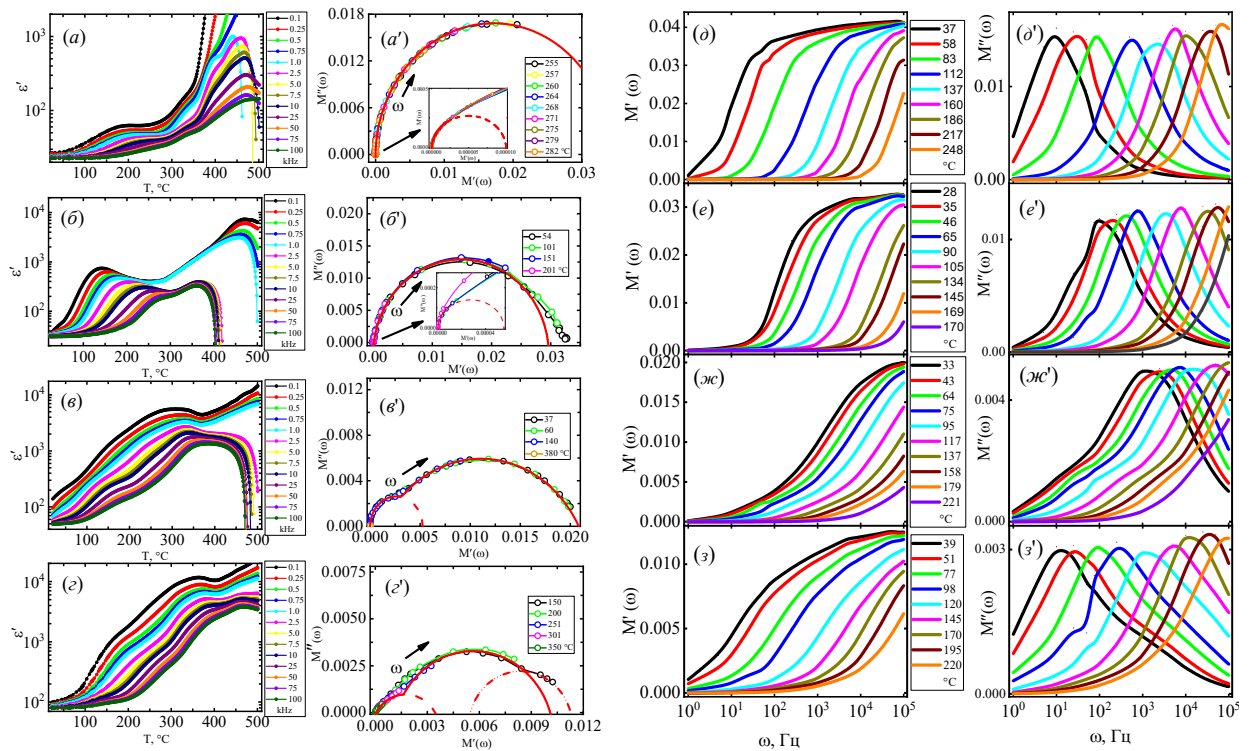


Рисунок 5 – Температурные зависимости ε' и диаграммы Коула-Коула в комплексной плоскости электрического модуля $M^*(\omega)$ составов $(1-x)\text{CFO}-x\text{PTO}$: $x = 0.0$ (a, a'), $x = 0.1$ (b, b'), $x = 0.4$ (v, v'), $x = 0.7$ (z, z') и частотные зависимости электрических модулей $M'(\omega)$ ($d-z$) и $M''(\omega)$ ($d'-z'$)

Правее верхних границ первых областей для всех составов расположены вторые области, где выше 400 °C наблюдается резкое уменьшение высокочастотных (ВЧ) ветвей $\varepsilon'(T)$, характерное для ферритов и обусловленное их высокой σ на ВЧ. На графиках явно видны аномалии, что может быть объяснено наличием более одного релаксатора и недебаевским типом релаксации.

Так как $(1-x)\text{PMnN}-x\text{PTO}$ и $(1-x)\text{PMnTO}-x\text{PTO}$ представляют собой релаксороподобные составы, для установления связи между частотой измерительного поля и T_m далее проведен анализ диэлектрических спектров $(1-x)\text{PbMn}_{0.33}\text{Nb}_{0.66}\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ и $(1-x)\text{PbMn}_{0.33}\text{Ta}_{0.66}\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ с помощью формулы Фогеля-Фульчера (1), которая учитывает степень взаимодействия

между случайными локальными релаксационными процессами, в данном случае дипольным откликом.

$$f = f_0 e^{\frac{-E_a}{T_m - T_{VF}}}, \quad (1)$$

где T_{VF} – температура Фогеля-Фульчера, интерпретируемая как температура «замерзания» электрических диполей или перехода в состояние дипольного стекла [4].

Далее в диссертации проведена оценка степени размытия фазового перехода составов $(1-x)\text{PMnN-xPTO}$ и $(1-x)\text{PMnTO-xPTO}$ и сделан вывод, что эти составы являются релаксороподобными сегнетомагнетиками-полупроводниками с размытыми ФП, а не классическими релаксорами.

Далее методом импедансной спектроскопии изучено поведение комплексного сопротивления $(Z^*) = Z' - jZ''$ составов PMnN, PMnT и CFO в композиции с PTO при различных температурах и в широком интервале частот. По зависимостям Z' и Z'' от частоты и диаграммам Найквиста установлено, что проводимость составов является термически активированной, и релаксация проводимости имеет недебаевский характер.

На рисунке 6 приведены зависимости $\rho''(\omega)$, $\rho'(\omega)$ и $\rho''(\rho')$ составов $(1-x)\text{CFO-xPTO}$ для $x = 0.0; 0.4; 0.6$ до и после наноструктурирования. В диапазоне частот 10^4 – 10^7 Гц зависимости $\rho'(\omega)$ CFO сходятся в одну линию по мере увеличения температуры. Между тем $\rho''(\omega)$ подавляется, показывая слабое релаксационное поведение, характеризующееся двумя максимумами. Низкочастотный максимум соответствует проводимости границ зерен, тогда как высокочастотный максимум соответствует проводимости объема зерен. Хотя эффекты, обусловленные границами и объемами зерен, явно не выделены на рисунках 6 (ρ' , ρ''), они становятся очевидными, когда каждая кривая рассматривается индивидуально.

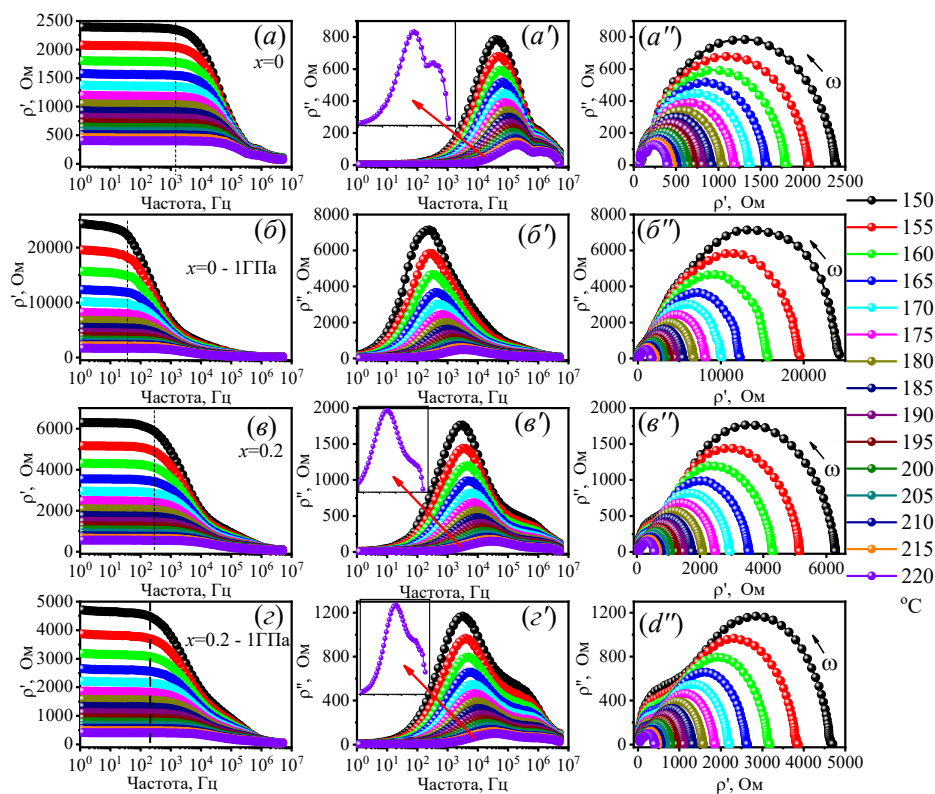


Рисунок 6 – Импедансная спектроскопия CoFe_2O_4 до (а, а', а'') и после (б, б', б'') наноструктурирования, а также композита $0.8 \text{CoFe}_2\text{O}_4-0.2\text{PbTiO}_3$ до (в, в', в'') и после (г, г', г'') наноструктурирования

Детальный анализ зависимостей $\rho'(T)$ и $\rho''(T)$ проведен с использованием соответствующих эквивалентных схем и параметров подгонки экспериментальных кривых. Обнаружено, что при $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ после наноструктурирования $\rho'(\omega)$ CFO увеличивается более чем в восемь раз. У наноструктурированных составов сопротивление границ зерен R_{gb} больше сопротивления объема зерен R_g , что обусловлено усилением диффузионных процессов при спекании керамики после наноструктурирования и увеличением толщины аморфного слоя.

Далее в диссертации изучены магнитоэлектрические свойства $(1-x)\text{PMnN}-x\text{PbTiO}_3$ и $(1-x)\text{PMnT}-x\text{PbTiO}_3$ и обнаружено, что на зависимостях магнитоэлектрического коэффициента $MD(B)$ и коэффициента магниторезистивности $MR(B)$ присутствуют по два участка с разными знаками, зависящими от частоты измерительного поля. Такие системы могут быть описаны моделью Максвелла-Вагнера (M–B), которая представляет

собой набор последовательно соединенных плоских конденсаторов, каждый из которых соответствует определенной фазе с определенными ε , $\text{tg } \delta$ и поляризованностью P , обусловленной свободными зарядами на границах раздела. Это, в свою очередь, приводит к дисперсии ε и потерям в переменных электрических полях, известных как М–В релаксация.

На рисунке 7 приведены зависимости $MD(B)$ и $MR(B)$ до и после наноструктурирования $(1-x)\text{CFO}-x\text{PFO}$ для разных концентраций.

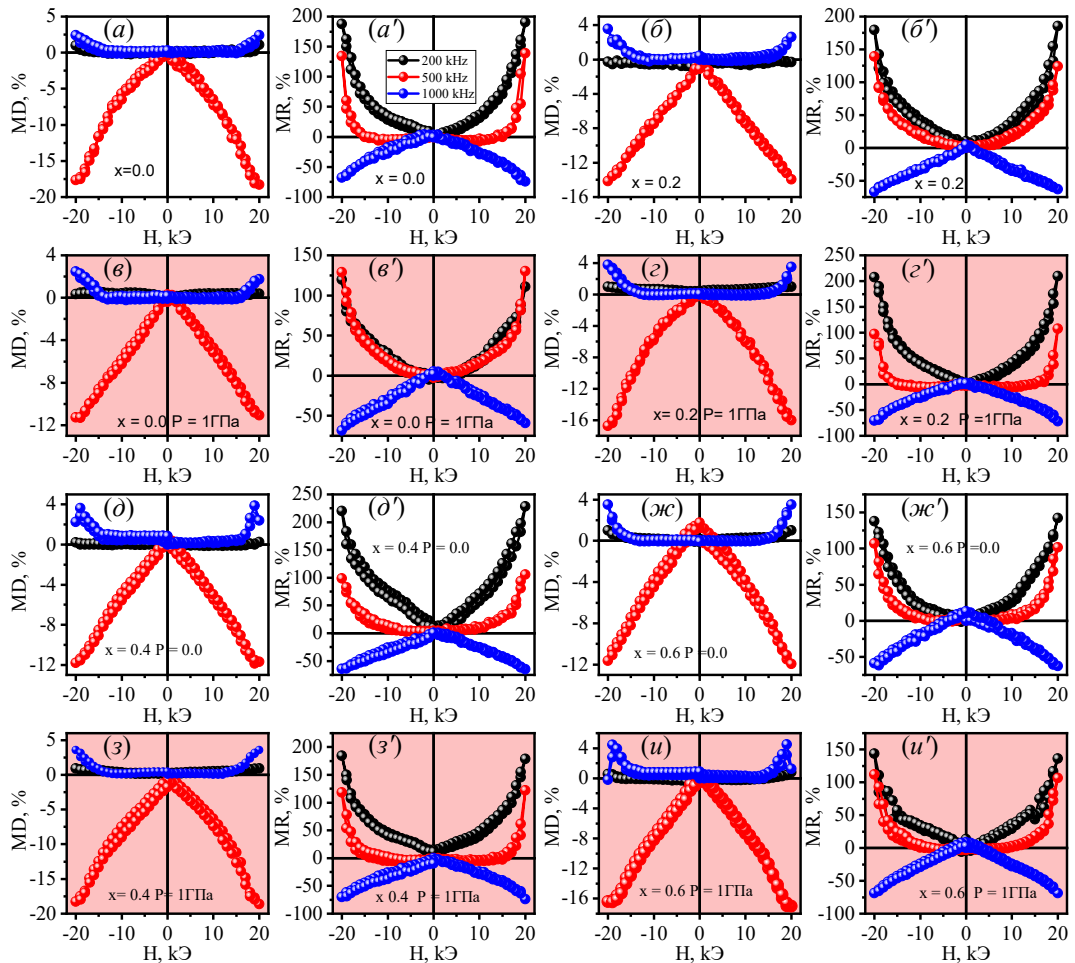


Рисунок 7 – Зависимости $MD(B)$ и $MR(B)$ составов $(1-x)\text{CFO}-x\text{PFO}$: исходные составы обозначены как $a(0.0)$, $a'(0.0)$, $b(0.2)$, $b'(0.2)$, $c(0.4)$, $c'(0.4)$, $d(0.6)$, $d'(0.6)$; наноструктурированные составы обозначены как $v(0.0)$, $v'(0.0)$, $z(0.2)$, $z'(0.2)$, $z(0.4)$, $z'(0.4)$, $u(0.6)$, $u'(0.6)$

Характерная для CFO отрицательная магнитострикция вызывает деформацию кристаллических решеток PFO и PFO, а это приводит к увеличению рассеяния носителей заряда. Коэффициент $MR(B)$ имеет более

широкий диапазон изменения по сравнению с $MD(B)$, а их знаки зависят от частоты измерительного поля. Положительные коэффициенты $MR(B)$ варьируются от 150% до 225% в зависимости от концентрации x , тогда как отрицательный $MR(B)$ остается равным примерно 75% и не зависит от x .

Далее представлены результаты изучения магнитных характеристик составов $(1-x)\text{PMnN}-x\text{PTO}$, $(1-x)\text{PMnT}-x\text{PbTiO}_3$ и $(1-x)\text{CFO}-x\text{PTO}$. В наших составах формируется стохастическая (случайная) магнитная структура с неоднородным распределением намагниченности. В этом случае магнитный порядок сохраняется для длин $2R_L \gg 2R_C$, где $2R_L$ – размеры стохастических доменов, а $2R_C$ – размеры частиц (D) или кластера. Использование модели случайной магнитной анизотропии предполагает, что оси легкого намагничивания в отдельных кристаллитах ориентированы случайным образом. Случайная ориентация кристаллографических осей приводит к образованию локальной, флуктуирующей в пространстве анизотропии. Так как петли $M(H)$ марганецсодержащих составов не насыщаются, используя закон приближения намагниченности к насыщению получены соответствующие значения намагниченности насыщения M_s . Эффективную локальную константу анизотропии образцов рассчитали по формуле:

$$K_{eff} = \frac{H_a M_s}{2}, \quad (2)$$

где H_a – поле анизотропии.

Далее в диссертации определены значения обменного поля H_R , коэрцитивного поля H_c , магнитной восприимчивости χ стохастических доменов. Используя модель Прейзаха [5] получены комбинации вставленных петель магнитного гистерезиса $(1-x)\text{CFO}-x\text{PTO}$, известных как гистероны. Гистероны применяются для исследования «внутренней» магнитной структуры как однофазных, так и многофазных магнитных составов (метод FORC (First Order Reversal Curves)). По экспериментальным результатам, полученным в данной главе, сформулировано *второе* научное положение, выносимое на защиту.

В пятой главе представлены результаты изучения динамики кристаллической решетки $(1-x)\text{PMnN-xPTO}$, $(1-x)\text{PMnT-xPTO}$ и $(1-x)\text{CFO-xPTO}$ методами оптической, инфракрасной и рамановской спектроскопии. В таблице 5 представлены результаты изучения ширины запрещенной зоны E_g твердых растворов до наноструктурирования $(1-x)\text{PMnN-xPTO}$. Обнаружено, что E_g имеет минимальное значение в ОМП, равное 3.10 эВ.

Таблица 5 – Значения энергий локальных уровней $(1-x)\text{PMnN-xPTO}$

Концентрация РТО	0	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
Значение энергии, эВ	3.63; 2.79	3.57; 2.70	3.67; 2.95	3.10	3.33; 2.62	3.64	3.68; 2.42	3.68

Характер изменения E_g твердых растворов $(1-x)\text{PMnN-xPTO}$ после наноструктурирования также немонотонен. Однако в ОМП ($x = 0.2$) E_g имеет максимальное значение, равное 3.58 эВ. Так же немонотонен характер изменения E_g $(1-x)\text{CFO-xPTO}$ в зависимости от концентрации x как до, так и после наноструктурирования. Однако у наноструктурированных составов E_g больше, чем до механоактивации. Для составов наноструктурированных $(1-x)\text{PMnT-xPTO}$ E_g практически не изменяется с изменением x .

Далее в диссертации изучены ИК-спектры всех составов. Выделенный интервал был аппроксимирован функцией Гаусса. Моды растяжения $(1-x)\text{PMnN-xPTO}$ представлены на рисунке 8 в виде трех графиков.

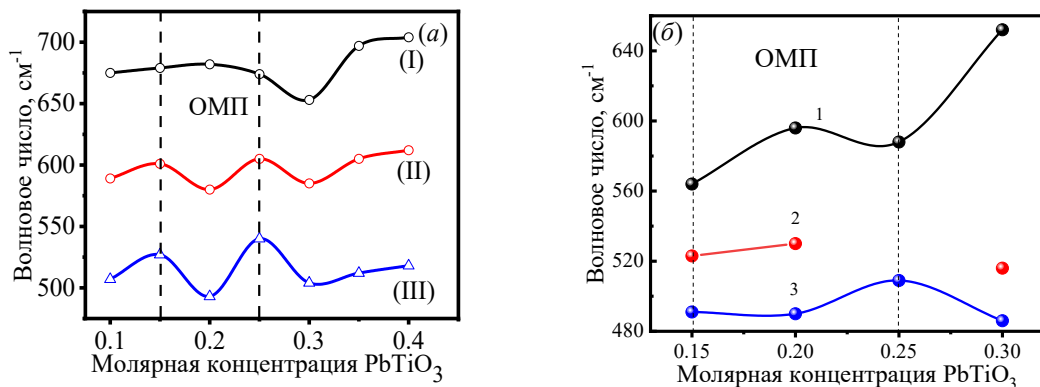


Рисунок 8 – Положение трех компонентов ИК-спектров твердых растворов $(1-x)\text{PMnN-xPTO}$ до (а) и после наноструктурирования (б)

Как видно из рисунка 8, после наноструктурирования значения всех колебательных мод значительно уменьшаются, что обусловлено вкладом разорванных связей атомов поверхности наноструктур. Аналогичные измерения были проведены и для $(1-x)$ PMnT- x PTO. Сравнение колебательных мод связей Pb – O, Mn – O и Ta – O до и после наноструктурирования показало, что для всех образцов частота колебательной моды связи Pb – O растет, а остальные моды немонотонно изменяются в зависимости от концентрации x .

Результаты изучения ИК-спектров макроскопических составов $(1-x)$ CFO- x PTO приведены на рисунке 9.

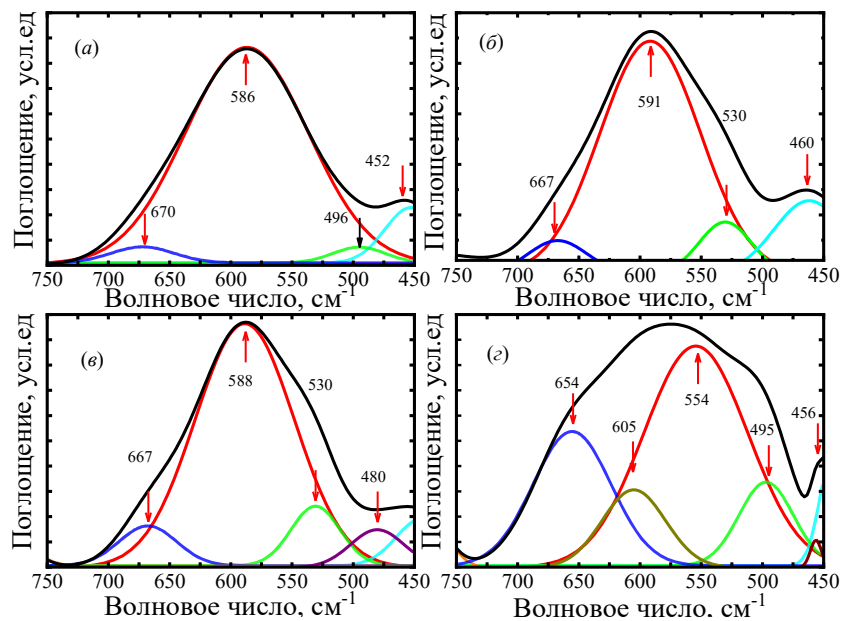


Рисунок 9 – ИК-спектры составов CoFe_2O_4 (а), $0.9\text{CoFe}_2\text{O}_4-0.1\text{PbTiO}_3$ (б), $0.6\text{CoFe}_2\text{O}_4-0.4\text{PbTiO}_3$ (в) и $0.3\text{CoFe}_2\text{O}_4-0.7\text{PbTiO}_3$ (г)

Аппроксимация спектров, как и для предыдущих случаев, проводилась гауссианой. Рассмотрим спектр CoFe_2O_4 (рисунок 9 (а)). Моды $\nu \sim 452 \text{ см}^{-1}$ и $\nu \sim 496 \text{ см}^{-1}$ могут быть отнесены к валентным колебаниям октаэдрических комплексов (Fe,Co – O), а мода $\nu \sim 586 \text{ см}^{-1}$ отнесена к валентному колебанию тетраэдрических комплексов (Fe – O). Мода $\nu \sim 670 \text{ см}^{-1}$ обусловлена присутствием Co в центрах тетраэдров. Для сложных составов (рисунок 9 (б-г)) моды $\nu \sim 667$ и 654 см^{-1} обусловлены присутствием ионов Co в центрах тетраэдров, и моды сдвигаются вправо с ростом концентрации PTO. Моды $\nu \sim 591$, 588 и 554 см^{-1} соответствуют колебаниям тетраэдрических комплексов Fe – O, но

примерно здесь же расположена мода валентного колебания гексаферрита. Мода при $\nu \sim 530 \text{ см}^{-1}$ нами отнесена к валентному колебанию кислородного октаэдра TiO_6 РТО. Моды $\nu \sim 495$ и 480 см^{-1} соответствуют валентным колебаниям (Fe, Co – O) октаэдрического комплекса CFO. Волновые числа 460 см^{-1} и 456 см^{-1} соответствуют деформационным колебаниям связей Fe – O в октаэдрах FeO_6 фазы PFO [6].

Таким образом, увеличение концентрации РТО приводит к более сложному ИК спектру и сдвигу частот компонентов, но сдвиг не является монотонным и зависит от концентрации сформировавшихся фаз.

Далее в диссертации изучены рамановские спектры $(1-x)\text{CoFO-xPbTiO}_3$ и $(1-x)(\text{PMnT-xPbTiO}_3)$. Некоторое размытие и смещение пиков $(1-x)\text{CoFO-xPbTiO}_3$ объясняется двумя причинами. Во-первых, свои вклады вносят пики CFO, РТО и PFO, и во-вторых, поликристаллический дизайн образца [7].

На рисунке 10 представлены рамановские спектры $(1-x)(\text{PMnT-xPbTiO}_3)$, которые представляют собой типичные спектры структур перовскита, из которого видно, что линии мягкой моды $E(\text{TO}_1)\text{--}E(\text{LO}_1)$ и $A_1(1\text{TO})$, не зависят от концентрации PbTiO_3 , а $B_1 + E$ линия, происходящая из F_{2u} -моды параэлектрической фазы, показывает слабую чувствительность к наличию PbTiO_3 . На основе полученных в данной главе результатов сформулировано **третье** научное положение, выносимое на защиту.

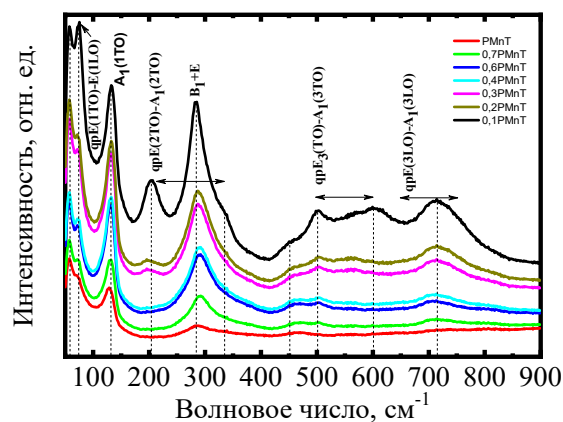


Рисунок 10 – Рамановские спектры $(1-x)(\text{PbMn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3\text{-}x\text{PbTiO}_3)$

В **заклЮчении** приведены основные научные результаты и выводы:

1. В диссертационной работе получены мультиферроики $(1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x(\text{PbTiO}_3)$ и $(1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3-x(\text{PbTiO}_3)$.
2. Установлена коррелированная связь между структурой и физическими свойствами $(1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x(\text{PbTiO}_3)$, $(1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3-x(\text{PbTiO}_3)$ и $(1-x)\text{CoFe}_2\text{O}_4-x\text{PbTiO}_3$.
3. Методом рентгеновской дифракции впервые обнаружено, что в составах $(1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x(\text{PbTiO}_3)$ образуется область морфотропного фазового перехода в интервале $0.15 \leq x \leq 0.25$, где сосуществуют две сегнетоэлектрические $R3m$ и $P4mm$ фазы.
4. Оптическим методом обнаружено, что ширина запрещенной зоны $(1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x(\text{PbTiO}_3)$ и $(1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3-x(\text{PbTiO}_3)$ слабо зависит от концентрации допанта.
5. Магнитными методами исследований показана возможность существенного изменения магнитной подсистемы $(1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x(\text{PbTiO}_3)$, $(1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3-x(\text{PbTiO}_3)$ и $(1-x)\text{CoFe}_2\text{O}_4-x\text{PbTiO}_3$ в результате допирования титанатом свинца.
6. Методами модульного и импеданс формализма показано, что составам $(1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x(\text{PbTiO}_3)$ и $(1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3-x(\text{PbTiO}_3)$ свойственна недебаевская релаксация диэлектрической проницаемости.
7. С использованием формулы Фогеля-Фульчера были проанализированы диэлектрические спектры составов и показано, что в небольшой окрестности T_m они удовлетворительно могут быть описаны этой формулой.
8. Степени размытия и релаксорности диэлектрической проницаемости с помощью формулы, подходящей для описания классических релаксоров и сегнетоэлектриков с размытыми фазовыми переходами, могут быть удовлетворительно оценены в узкой окрестности T_m однофазных составов. В многофазных составах эта формула неприменима.
9. Анализ Фогеля-Фульчера температурных зависимостей ε' , $1/\varepsilon'$ и ε'' для составов $(1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x(\text{PbTiO}_3)$ и $(1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3-x(\text{PbTiO}_3)$ на различных

частотах позволяет отнести эти составы к релаксороподобным сегнетомагнетикам-полупроводникам, а не к классическим релаксорам.

10. Наноструктурирование составов $(1-x)\text{CoFe}_2\text{O}_4-x\text{PbTiO}_3$ приводит к уменьшению D и увеличению коэрцитивного поля H_c .

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смоленский Г. А. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики / Г. А. Смоленский, В. А. Боков, В. А. Исупов, Н. Н. Крайник, Р. Е. Пасынков, М. С. Шур. – Л.: Наука. – 1971. – 476 с.
2. Ciomaga C. E. Functional properties of percolative $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-PbTiO}_3$ composite Ceramics / E. C. Cristina, A. Mirela, I. Turcan, V. L. Alexandru, T. Sorin, M. Grigoras, N. Lupu, J. Banys, L. Mitoseriu // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – 775. – P. 90.
3. Ciomaga, C. E. Functional properties of percolative $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-PbTiO}_3$ composite ceramics/ Cristina E. Ciomaga, M. Airimioaei, I. Turcan, A.V. Lukacs, S. Tascu, M. Grigoras, N. Lupu, J.Banys, L. Mitoseriu //Journal of Alloys and Compounds 775 (2019) pp.90-99.
4. Nina Kosova, Evgenii Avvakumov, Mamoru Senna, Soft Mechanochemical Synthesis, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002. <https://doi.org/10.1007/b114163>
5. Mayergoyz I. D. Hysteresis models from the mathematical and control theory points of view / Mayergoyz I. D. // J. Appl. Phys. – 1985. – 57. – 3803–3805. <https://doi.org/10.1063/1.334925>.
6. White W. B. Interpretation of the vibrational spectra of spinels/ W. B. White, B. A. DeAngelis // Spectrochim. Acta Part A Mol. Spectrosc. – 1967. – 23. – P. 985.
7. Torgashev V. I. Magnetic and dielectric response of cobalt-chromium spinel CoCr_2O_4 in the terahertz frequency range / V. I. Torgashev, A. S. Prokhorov, G. A. Komandin, E. S. Zhukova, V. B. Anzin, V. M. Talanov, L. M. Rabkin, A. A. Bush, M. Dressel, B. P. Gorshunov // Phys. Solid State. – 2012. – 54. – P. 350.

Список авторских публикаций

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень Scopus, Web of Science

- A1.** Nanostructured multiferroic $\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ and its physical properties / E. N. Ubushaeva, K. G. Abdulvakhidov, I. V. Mardasova [et al.] // *Technical Physics*. – 2010. – Vol. 55, No. 11. – P. 1596-1599. – DOI 10.1134/S1063784210110083. [Русскоязычная версия: Наноструктурированный мультиферроик $\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ и его физические свойства / Э. Н. Убушаева, К. Г. Абдулвахидов, И. В. Мардасова [и др.] // *Журнал технической физики*. – 2010. – Т. 80, № 11. – С. 49-52]. K1
- A2.** Phase transitions, magnetic and dielectric properties of $\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ / K. G. Abdulvakhidov, E. N. Ubushaeva, I. V. Mardasova [et al.] // *Ferroelectrics*. – 2016. – Vol. 494, No. 1. – P. 182-191. – DOI 10.1080/00150193.2016.1142749. K2
- A3.** Structure and physical properties of solid solutions based on the $\text{PbMn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ relaxor ferroelectric / B. K. Abdulvakhidov, S. A. Sadykov, K. G. Abdulvakhidov [et al.] // *Materials Research Express*. – 2019. – Vol. 6, No. 12. – P. 126319. – DOI 10.1088/2053-1591/ab5d4e. K1
- A4.** Synthesis and physical properties of the ferroelectromagnetic composites $(1-x)\text{PbMn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ / K. Abdulvakhidov, A. Soldatov, I. Dmitrenko [et al.] // *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. – 2021. – Vol. 127, No. 6. – DOI 10.1007/s00339-021-04567-w. K1
- A5.** Study of the structural-phase state and physical properties of $(1-x)(\text{CoFe}_2\text{O}_4)-x(\text{PbTiO}_3)$ compositions / B. Abdulvakhidov, S. Sadykov, Z. Li [et al.] // *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. – 2022. – Vol. 128, No. 4. – DOI 10.1007/s00339-022-05442-y. K1
- A6.** Structure, impedance spectroscopy, and magnetic properties of nanostructured composites $(1-x)\text{CoFe}_2\text{O}_4-x\text{PbTiO}_3$ / B. Abdulvakhidov, S. Sadykov, K. Abdulvakhidov [et al.] // *Ceramics International*. – 2024. – Vol. 50, No. 22. – P. 47792-47804. – DOI 10.1016/j.ceramint.2024.09.123. K1

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень ВАК

A7. Структурные параметры и магнитные свойства шпинели CoFe_2O_4 и $0.4\text{CoFe}_2\text{O}_4 - 0.6\text{PbTiO}_3$ / Б. К. Абдулвахидов, С. А. Садыков, Ч. Ли [и др.] // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки. – 2023. – Т. 38, № 4. – С. 68-73. – DOI 10.21779/2542-0321-2023-38-4-68-73.

Публикации в сборниках трудов конференций

A8. Dielectric and Magnetic Properties of $(1-x)\text{PbMn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ Solid Solutions / B. K. Abdulvakhidov, S. A. Sadykov, K. G. Abdulvakhidov [et al.] // 2017 International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA 2017) Jabalpur, India, October 14 – 16, 2017 : Abstracts & Schedule / Editors: V. K. Gupta I. A. Parinov S.-H. Chang. – Jabalpur, India: PDPM Indian Institute of Information Technology, 2017. – P. 1.

A9. Изучение магнитных свойств сегнетокерамики $\text{PbMn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3$ / Б. К. Абдулвахидов, С. А. Садыков, А. А. Амиров [и др.] // LI Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния, ФКС-2017, 11–16 марта 2017 г., Санкт-Петербург : сборник тезисов и список участников / Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова». – Гатчина: ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт», 2017. – С. 177. – Режим доступа: http://fks2017.pnpi.spb.ru/uploads/attachment/36/%D0%A2%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%81%D1%8B_%D0%A4%D0%9A%D0%A1-2017.pdf (дата обращения 06.06.2025)

A10. Физические свойства и структура твердых растворов $(1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - x(\text{PbTiO}_3)$ / И. П. Дмитренко, Б. К. Абдулвахидов, А. В. Солдатов [и др.] // Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием «Химия твердого тела и функциональные материалы» и XII Всероссийского симпозиума с международным участием «Термодинамика и материаловедение», 21-27 мая 2018 г., г. Санкт-Петербург / Российская академия наук [и др.] ; под редакцией В. В. Гусарова. – Санкт-Петербург: НОВБЫТХИМ, 2018. – С. 209.

A11. Синтез и исследование композитов на основе $(\text{CoFe}_2\text{O}_4)_x\text{-(PbTiO}_3)_{1-x}$ / В. А. Шкуро, К. Г. Абдулвахидов, А. В. Солдатов [и др.] // Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием «Химия твердого тела и функциональные материалы» и XII Всероссийского симпозиума с международным участием «Термодинамика и материаловедение», 21-27 мая 2018 г., г. Санкт-Петербург / Российская академия наук [и др.] ; под редакцией В. В. Гусарова. – Санкт-Петербург: НОВБЫТХИМ, 2018. – С. 348.

A12. Физические свойства твердых растворов $\text{PbMn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ / Б. К. Абдулвахидов, С. А. Садыков, М. А. Сирота [и др.] // Релаксационные явления в твердых телах : материалы XXIV Международной конференции (г. Воронеж, 24-27 сентября 2019 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный технический университет" ; редакционная коллегия: Коротков Л. Н. - ответственный редактор [и др.]. - Воронеж : ВГТУ, 2019. – С. 64-65.

A13. Abdolvakhidov, B. Study of the Physical Properties of Multiferroic $(1 - x)\text{CoFe}_2\text{O}_4 - x\text{PbTiO}_3$ System / B. Abdolvakhidov, Zh. Li // 10th Anniversary International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA 2021–2022), Divnomorsk, Russia, May 23–27, 2022 : Abstracts & Schedule / Don State Technical University, Southern Federal University, National Kaohsiung University of Science and Technology ; I. A. Parinov, A. N. Soloviev, S.-H. Chang (Eds.). – Rostov-on-Don ; Taganrog : Southern Federal University Press, 2022. – P. 54.

A14. Исследование проводимости композитов $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-PbTiO}_3$ методом импедансной спектроскопии / Б. К. Абдулвахидов, С. А. Садыков, Л. А. Алиева, [и др.] // Материалы международной конференции III Международная конференция «Тенденции развития физики конденсированных сред», 30-31 октября 2023 г., г. Фергана / Министерство Высшего Образования, Науки и Инноваций Республики Узбекистан [и др.]; под редакцией Проф. И.И.Зокиров [и др.] – Республика Узбекистан, г. Фергана, 2023. – С. 204.