

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южный федеральный университет»

На правах рукописи

Ли Чжэню

Ли Чжэню

**Динамика решетки, магнитные и электрофизические свойства
наноструктурированных ортоферрита, феррит-граната и феррит-
манганита иттербия**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

2.6.6 - Нанотехнологии и наноматериалы

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,

доцент Абдулвахидов Камалудин Гаджиевич

Ростов-на-Дону

2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Абдулвахидов Камалудин Гаджиевич (Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Международный исследовательский институт интеллектуальных материалов)

Официальные оппоненты: **Юрасов Юрий Игоревич**, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», ведущий научный сотрудник.

Амиров Абдулкарим Абдулнатинович, кандидат физико-математических наук, заместитель начальника отдела разработки ускорительно-накопительного комплекса Управления по созданию исследовательской установки «СИЛА» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Защита диссертации состоится «19» января 2024 года в 13:00 на заседании диссертационного совета **ЮФУ801.01.04** по физико-математическим наукам (*специальность 2.6.6*) при Южном федеральном университете в здании Центра Наукоемкого Приборостроения ЮФУ по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д. 28.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ЮФУ им. Ю. А. Жданова по адресу: г.Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж и на сайте: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1319649/>

Автореферат разослан

«___»_____2023 года

Отзывы на автореферат (*в нем укажите дату, а также полностью свои фамилию, имя, отчество, учёную степень со специальностью, звание, организацию, подразделение, должность, адрес, телефон, 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. Сладкова, д. 178/24, МИИ ИМ ЮФУ, а также в формате .pdf – на e-mail: lguda@sfedu.ru.

Учёный секретарь
диссертационного совета
ЮФУ801.01.04. , к.ф.-м.н.

_____ Гуда Любовь Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В последние десятилетия публикации, посвященные технологии наноматериалов, занимают прочные позиции среди всех публикаций физического материаловедения. Интерес к наноматериалам обусловлен тем, что функциональные устройства, основой которых являются структуры нанометрового масштаба, обладают уникальными физическими свойствами, не характерными для структур микро-и макромасштабов.

Независимо от масштаба классификации наноматериалов, все они обладают размерным эффектом. Стоит отметить, что любым материалам, размеры которых менее одного микрона, свойственны размерные эффекты, проявляющиеся при измерении тех или иных физических свойств.

Формирование наноматериалов можно осуществлять по одному из двух путей: первый - это «снизу- вверх», т.е. сборка из атомов, и второй - «сверху-вниз» - диспергирование макроскопических материалов [1].

Второй метод является менее затратным и менее трудоемким, благодаря тому, что в этом методе исследователь имеет дело уже с образовавшейся макроскопической кристаллической структурой и остается единственная задача - это диспергирование макрокристаллической структуры до нанометрового или мезоскопического масштаба. Чаще всего это достигается ультразвуковым или механо-химическим методами. Продукты таких воздействий принято называть ультрадисперсными частицами или наноструктурами.

Среди таких наноразмерных веществ большой интерес представляют структуры, представляющие собой составы из редкоземельных и 3d-элементов. Формируемые при этом составы в большинстве своем являются перовскитоподобными мультиферроиками со слабым ферромагнетизмом и обладают уникальными физическими свойствами, благодаря фазовым переходам, реализуемых в них в широком диапазоне температур. Параметры

физических свойств мультиферроиков можно варьировать в широком диапазоне частот и температур, благодаря возможности изменения концентрации не только химических дефектов (допантов), но и топологических дефектов (дислокации и точечные дефекты).

Таким образом, в методе «сверху - вниз» факторами, влияющими на физические свойства материалов, являются размерность частиц и топологические дефекты.

Анализ литературы показывает, что по редкоземельным мультиферроикам, полученным методом «сверху-вниз», в состав которых входит элемент Yb, публикаций практически нет, и в данной работе предпринята попытка восполнения этого пробела.

Таким образом, диссертация посвящена **актуальной проблеме**, а именно получению и установлению связи структуры и свойств иттербиевых мультиферроиков, находящихся с кристаллографической точки зрения в различных структурных состояниях, а с термодинамической точки зрения в различных метастабильных состояниях.

Цель: - оптимизация условий получения наноструктурированных ортоферрита YbFeO_3 , граната $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и сложных составов $\text{YbMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$;

- исследование их физических свойств в широком интервале температур, частот и магнитных полей;

- установление связи между структурой и их физическими свойствами.

Задачи, которые ставились для достижения цели:

- получить твердофазным методом $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, YbFeO_3 и $\text{YbMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$;

- наноструктурирование синтезированных порошков при различных давлениях и их фазовый анализ;

- измерение параметров магнитных петель гистерезиса;

- изучить ЭПР и ИК-спектры наноструктурированных порошков;

- спекание керамических образцов;

- провести диэлектрических и гальваномагнитных свойств;

- провести измерений импедансной и оптических спектроскопии;

Научная новизна

В диссертационной работе **впервые:**

- обнаружены критические значения размеров D_{crit} наночастиц ортоферрита $YbFeO_3$ и граната $Yb_3Fe_5O_{12}$, для которых характерны максимальные значения коэрцитивного поля H_c и остаточной намагниченности M_r ;
- обнаружено, что у наноструктурированных методом «сверху-вниз» составов $YbFeO_3$, $Yb_3Fe_5O_{12}$ и $YbMn_{1-x}Fe_xO_3$ углы наклонов и вращения кислородных октаэдров и длины связей существенно отличаются от аналогичных параметров макроскопических составов.

Научная и практическая значимость определяются тем, что полученные результаты развивают и дополняют представления о структурных изменениях в процессе наноструктурирования редкоземельных мультиферроиков методом «сверху-вниз» и могут быть применены при разработке активных элементов для функциональных устройств микроэлектроники и спинтроники.

Впервые показано, что механический метод получения наноструктур позволяет управлять целевыми физическими свойствами гексаферритов и феррит - манганитов иттербия.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Обнаружены критические давления механической активации, равное 700 МПа для ортоферрита иттербия $YbFeO_3$ и 750 МПа для феррит-граната иттербия $Yb_3Fe_5O_{12}$, при которых все длины связей Fe-O кислородных октаэдров FeO_6 и Yb-O додекаэдров YbO_8 обоих составов имеют максимальные значения, кроме связей Fe-O₃ и Yb-O₃, которые имеют минимальные значения. Формируемые при этих давлениях наночастицы $YbFeO_3$ имеют размер ~ 50 нм, а $Yb_3Fe_5O_{12}$ - ~ 75 нм. Резкие скачки параметров элементарных ячеек, наблюдаемые выше этих давлений,

обусловлены таким же резким ростом концентраций структурных дефектов и «разрыхлением» кристаллических решеток.

2. В гексагональной фазе наноструктурированного $\text{YbMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ существуют особые концентрационные точки x : $0.5 \div 0.6$, являющаяся нижней границей композита, где все длины связей и валентные углы имеют меньшие значения по сравнению с макрокристаллическим составом, и $x = 0.8$, являющаяся верхней концентрационной границей композита, где состав имеет локальные экстремумы не только длин связей додекаэдров, но и параметров элементарных ячеек. Пористость, плотность и параметры элементарной ячейки в точке $x = 0.5$ имеют минимальные значения.

3. Уменьшение размеров областей когерентного рассеяния D YbFeO_3 , $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ до критических величин приводит к росту волновых чисел мод колебаний ИК-спектров, силовых констант и немонотонному уменьшению ширины запрещенной зоны E_g . Аномалии на диэлектрических спектрах обусловлены откликом кристаллической структуры составов на магнитные фазовые переходы.

4. Для наноструктурированных редкоземельных феррит-граната иттербия $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и ортоферрита иттербия YbFeO_3 установлены вторые критические размеры частиц D ($D_{\text{crit}(2)}$), равные соответственно 75 нм и 54 нм, которым соответствуют максимальные значения коэрцитивного поля H_c и остаточной намагниченности M_r . Размеры частиц $D_{\text{crit}(2)}$ меньше корреляционной длины магнитного поля L и больше первого критического размера ($D_{\text{crit}(1)}$), при котором структура становится однодоменной.

Достоверность научных результатов диссертации обеспечивается использованием комплекса современных экспериментальных методов и оборудования, а также непротиворечивостью физическим законам экспериментальных результатов, опубликованных автором в международных научных журналах.

Личный вклад автора

Выбор научной темы, постановка и решение задач, и обсуждение полученных результатов проводилось автором совместно с научным руководителем. Все основные научные результаты получены лично автором на оборудовании Международного исследовательского института интеллектуальных материалов Южного федерального университета.

Апробация основных результатов диссертации

Результаты диссертации были представлены на: **Международная конференция «Физика Сегнетоэластиков»** с. 57-58, 2022 г. Воронеж; 10th anniversary international conference on “Physics and mechanics of new materials and their applications” (PHENMA 2021-2022) Divnomorsk, Krasnodar region, Russia.

Публикации: по теме диссертации опубликовано 8 работ, из них 4 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК и индексируемых в Scopus и Web of Science.

Объем и структура работы Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 136 страниц основного текста, 60 рисунков, 20 таблиц, из 19 страниц списка литературы и 2 страницы авторских публикаций, обозначенных литерой А.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава представляет собой литературный обзор по редкоземельным отроферритам, гранатам и манганитам, имеющим отношение к теме диссертации.

Вторая глава посвящена описанию методики получения образцов, аппаратуре и методике проведения измерений.

В **третьей** главе представлены результаты изучения микроструктуры составов методами электронной микроскопии и рентгеновской дифракции. Получены зависимости размеров областей когерентного рассеяния, микродеформаций и параметра элементарной ячейки граната $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ от давления наноструктурирования. Параметр элементарной ячейки претерпевает резкий скачок при давлении 800 МПа из-за «разрыхления» кристаллической решетки (см. рис.1), что связано с резким увеличением концентрации структурных дефектов.

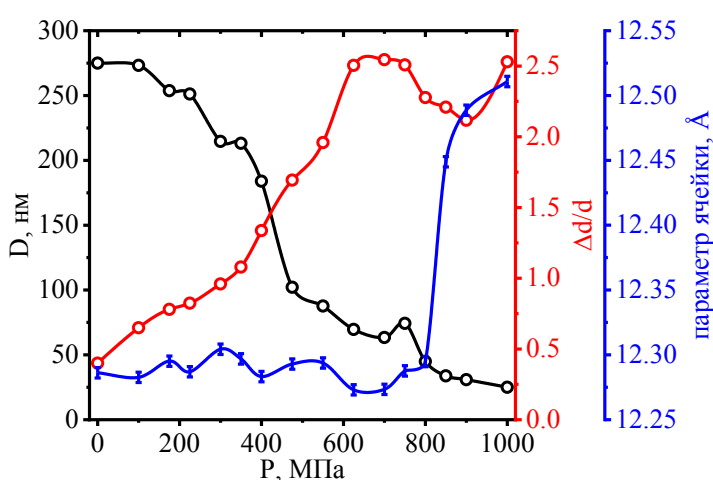


Рис. 1 - Зависимости D (черный), $\Delta d/d$ (красный) и постоянной решетки (синий) от давления механической активации $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$

Давление механоактивации 750 МПа, которому соответствуют размеры $D = 75$ нм и некоторое

уменьшение значений дислокаций, является некоторым пороговым давлением, выше которого наблюдается резкий скачок дислокаций [А3]. При этом давлении наблюдаются максимальные значения волновых чисел полос поглощения и силовых констант связей $(\text{Fe-O})_b$, $(\text{Fe-O})_o$ и $(\text{Yb-O})_d$ (см.табл.1).

Табл.1 - Зависимость размеров наночастиц, волновых чисел полос поглощения и силовых констант от давлений механоактивации, $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$

Р, МПа	D, нм	$\nu(\text{Fe-O})_b$, см^{-1}	Силовая пост, (Н/см)	$\nu(\text{Fe-O})_o$, см^{-1}	Силовая пост, (Н/см)	$\nu(\text{Yb-O})_d$ (см^{-1})	Силовая пост, (Н/см)
0	275	641	3.029	602	2.671	554	2.664
350	213	648	3.095	604	2.689	559	2.712
750	75	659	3.201	612	2.761	561	2.732
1000	25	652	3.133	608	2.725	560	2.722

Далее изложены XRD - результаты изучения YbFeO_3 , параметры элементарной ячейки которого уточнены методом полнопрофильного

анализа Ритвельда. Механоактивация при давлениях 900 и 1100 МПа сопровождается некоторым увеличением D и уменьшением $\Delta d/d$ [A4].

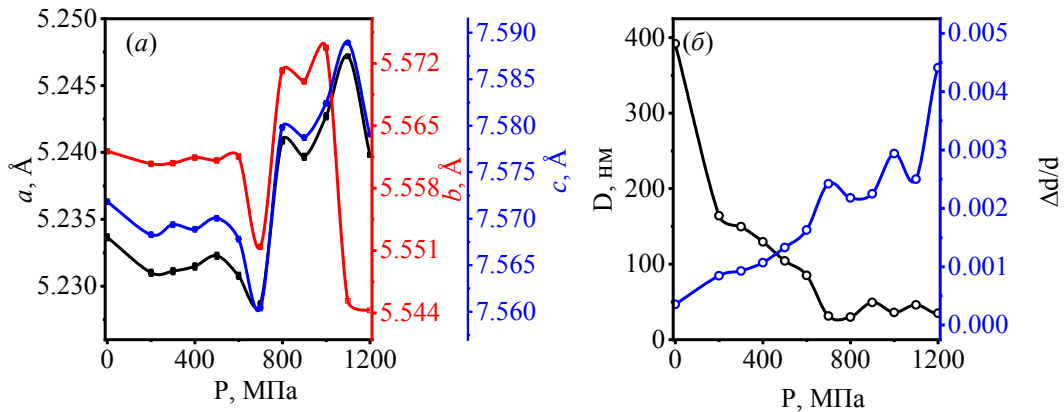


Рис.2-Зависимость параметров элементарной ячейки (a), областей когерентного рассеяния D и микродеформаций $\Delta d/d$ (b) от давления механоактивации YbFeO_3

Такая ситуация имеет место при динамической рекристаллизации. Рекристаллизационному процессу, характерному этим давлениям, свойственна миграция точечных дефектов, «залечивание» некоторой части дислокаций и изменение параметров элементарной ячейки. При больших давлениях кристаллическая решетка претерпевает заметные искажения и переходить в метастабильное состояние. Поведение углов наклона, поворотов и длин связей в кислородных октаэдрах FeO_6 контролировались с помощью программы Fullprof. На рис.3(a - e) представлены модели таких искаженных структур и стартового образца.

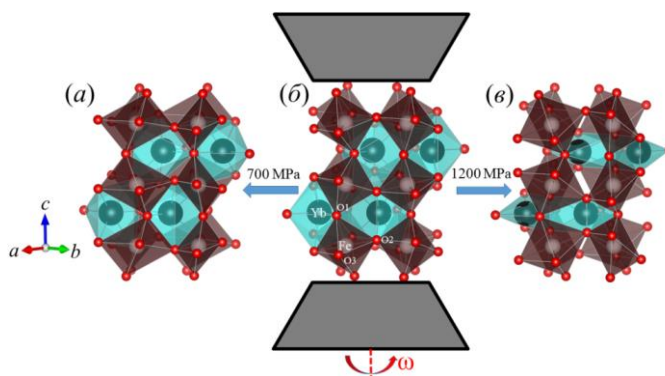


Рис.3 - Модельное представление структурных изменений ортоферрита YbFeO_3 при давлении 700 МПа - (a), стартовый образец - (b) и 1200 МПа - (c)

Значения $\theta^\circ = (180^\circ - \angle \text{Fe-O}_1 -$

Fe)/2 и угла вращения $\varphi^\circ = (90^\circ - \angle O-O-O)/2$ между соседними октаэдрами приведены в **табл.2**. Практически таким же образом, как и следовало ожидать, изменяются углы и длины связей в додекаэдрах YbO_8 (см. рис.4).

В **табл. 3** приведены длины связей додекаэда YbO_8 .

Табл. 2 - Углы наклона θ° , поворота φ° октаэдров и длины связей $YbFeO_3$

P, МПа	θ°	φ°	Fe-O ₂ , Å	Fe-O ₃ , Å	Fe-O ₁ , Å
0	18.88	11.9	2.024	2.004	2.002
200	18.87	12.4	2.034	1.983	2.002
300	18.85	10.3	2.035	1.955	2.002
400	19.88	12.4	2.024	1.984	2.012
500	19.95	13.8	2.054	1.964	2.023
600	18.87	12.4	2.091	1.961	2.014
700	20.33	3.3	2.375	1.496	2.023
800	23.97	2.5	2.054	1.964	2.022
900	20.42	7.2	2.083	1.833	2.021
1000	12.69	9.6	2.041	1.891	2.022
1100	28.45	7.5	2.006	1.950	2.051
1200	22.58	1.7	2.315	1.915	2.061

Искажения (смятие) кислородного октаэдра FeO_6 и додекаэдра YbO_8 (изменение углов наклона, поворота и длин связей) в свою очередь должны влиять на электрические, колебательные и магнитные свойства $YbFeO_3$, которые более подробно рассмотрены в диссертации.

Табл. 3 - Длины связей додекаэдра YbO_8 ортоферрита $YbFeO_3$

P, МПа	Yb-O ₁ , Å	Yb-O ₂ , Å	Yb-O ₃ , Å	Yb-O ₄ , Å	Yb-O ₅ , Å
0	2.29	2.23	2.66	2.47	2.30
200	2.27	2.21	2.66	2.48	2.31
300	2.25	2.20	2.66	2.48	2.31
400	2.27	2.17	2.64	2.50	2.29
500	2.25	2.20	2.66	2.48	2.23
600	2.26	2.21	2.64	2.49	2.28
700	3.11	2.53	2.57	2.57	3.48
800	2.23	2.20	2.67	2.47	2.24
900	2.52	1.92	2.75	2.31	2.53
1000	2.30	2.19	2.68	2.44	2.29
1100	2.50	2.04	2.93	2.14	2.39
1200	2.52	1.9	2.87	2.19	2.5

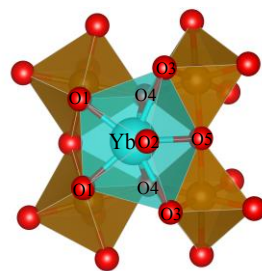


Рис.4-Модельное представление додекаэдра YbO_8 в окружении FeO_6

На основании проведенных экспериментальных результатов сформулировано **первое** научное положение, выносимое на защиту.

Далее проведен сравнительный анализ дирактометрических данных составов $\text{YbMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ до (рис.5) и после наноструктурирования (рис.6). Судя по рис.5, в интервале примерно $x = 0.1 - 0.5$ (0.6) формируются твердые растворы $\text{Yb}(\text{Mn,Fe})\text{O}_3$ гексагональной сингонии, для которых характерна

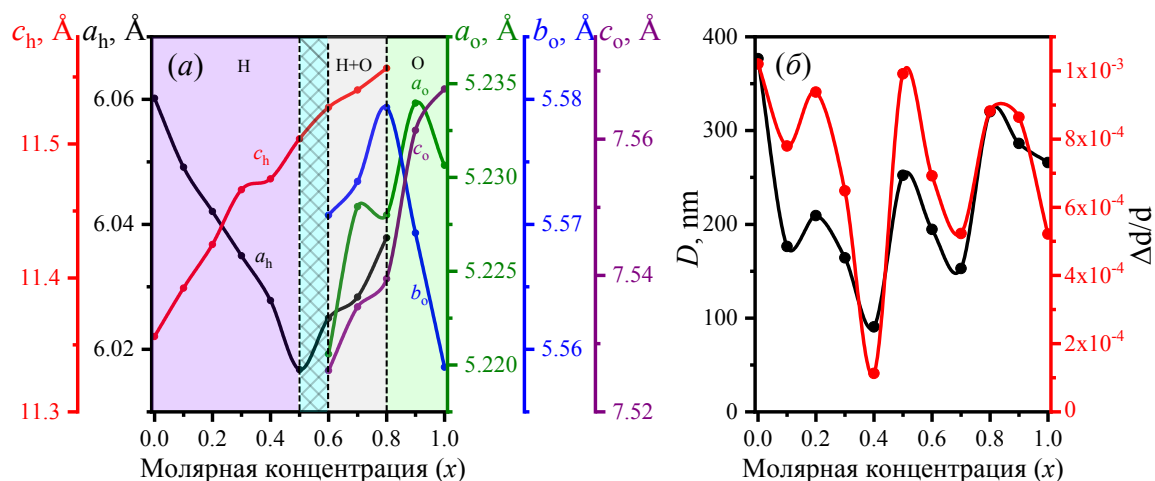


Рис.5 - Зависимости параметров элементарных ячеек гексагональной и орторомбической фаз (а), размеров D и величин $\Delta d/d$ (б) микрокристаллических составов $\text{YbFe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{O}_3$ молярной концентрации ионов Fe^{3+}

одинаковая тенденция изменения D и $\Delta d/d$. В точке $x = 0.5$ происходит деформация кристаллической решетки за счет образования дополнительной фазы орторомбической сингонии [A2]. Начиная с $x = 0.6$ увеличиваются не только a_h , но и параметры орторомбической фазы. Соответствующая интервалу $x = 0.6 - 0.8$ состав представляет собой композит, и в этой области происходит согласованное изменение параметров элементарных ячеек сосуществующих фаз композита. Как видно, в области формирования твердых растворов происходит уменьшение D и $\Delta d/d$. Характерным для области формирования композита ($x = 0.6 - 0.8$) является то, что линейные параметры элементарных ячеек обеих фаз растут с ростом x . Далее в орторомбической фазе параметры b_o и a_o при $x \rightarrow 1.0$ уменьшаются, а параметр c_o растет. В этой фазе изменения D и $\Delta d/d$ имеют одинаковую тенденцию.

Наноструктурированным составам $\text{YbMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ [A1] характерны метастабильная кристаллическая структура и более размытые дифракционные профили, чем макроскопическим составам. Сингония

составов в концентрационном интервале $x = 0.0 - 0.6$ гексагональная - ($P6_3cm$), далее в интервале $x = 0.6 - 0.8$ сосуществуют Н и О - фазы, а правее $x = 0.8$ - ортогональная - ($Pnma$) и они соответствуют первоначальным сингониям.

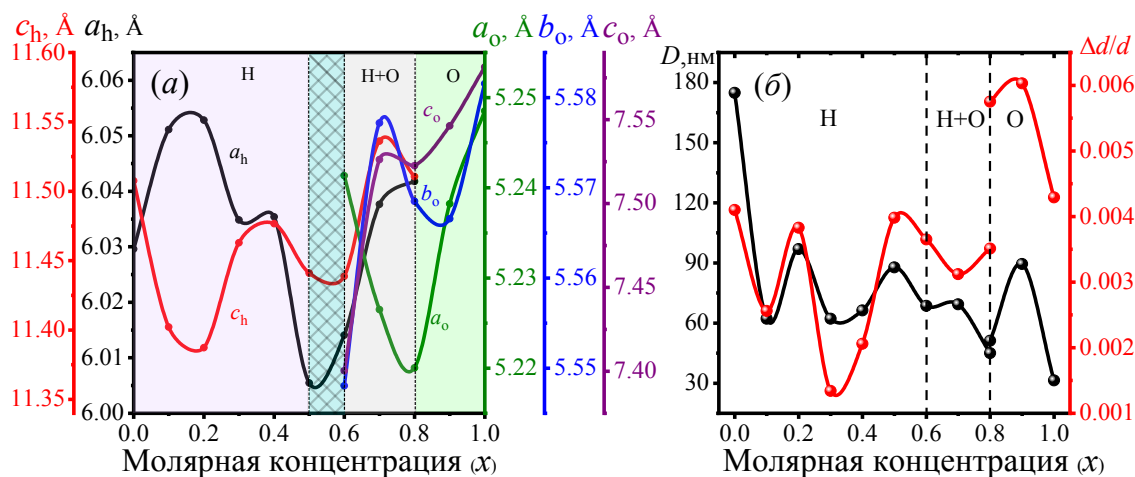


Рис.6 - Зависимость параметров решетки Н и О - фаз наноструктурированных при давлении 1 ГПа составов $YbMn_{1-x}Fe_xO_3$ (а), размеров D и $\Delta d/d$ (б) от молярной концентрации ионов Fe^{3+}

Как видно из рис. 6(а), минимум параметра c_h имеет место уже при $x = 0.2$, а параметр a_h имеет в этой точке максимальное значение. Правее этой точки параметру c_h характерен немонотонный рост, а минимум на зависимости $a_h(x)$ и загиб вверх наблюдается в точке $x = 0.5$. В области существования композита линейные параметры c_h Н - фазы, c_o и b_o О - фазы достигают максимумов в точке $x = 0.7$. Зависимость $a_o(x)$ имеет загиб вверх в точке $x = 0.8$ и в последующем она практически линейно растёт. До механоактивации поведение параметров элементарной ячейки Н - фазы с изменением концентрации ионов Fe^{3+} таково, что c_h практически линейно уменьшается до $x = 0.5$, а параметр a_h монотонно растёт до правой границы композита – (Н + О) - фаз. Как видно из рис.5(б) и рис.6(б), параметры D и $\Delta d/d$ имеют существенные различия до и после механоактивации; они на порядок больше после наноструктурирования.

Таким образом, химические дефекты, каковыми являются допанты - Fe^{3+} для стартовой структуры $YbMnO_3$, и структурные дефекты, генерированные

в процессе наноструктурирования синтезированных составов, являются конкурирующими факторами, влияющими на кристаллическую структуру и физические свойства $\text{YbMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$.

Так как многие свойства ионных кристаллических тел определяются длинами связей между соседними ионами и углами между смежными связями (валентные углы), то представляло интерес изучение зависимости длин связей и валентных углов $\text{YbMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ от x до и после наноструктурирования. В диссертации нами приведены соответствующие длины связей и валентные углы Н – фазы $\text{YbMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$.

В Н- фазе YbMF представляет собой совокупность тригональных бипирамид $\text{MnO}_5/\text{FeO}_5$ и двух неэквивалентных искаженных пентагональных бипирамид Yb_1O_7 и Yb_2O_7 (см. рис.7). Тригональная бипирамида $\text{MnO}_5/\text{FeO}_5$ образована ионом марганца (железа) Mn/Fe и пятью ионами кислорода. Длины связей ($\text{Mn}-\text{O}_1$) и ($\text{Mn}-\text{O}_2$) растут с ростом x . Связи ($\text{Mn}-\text{O}_3$) и ($\text{Mn}-\text{O}_4$) уменьшаются на $0.005 \pm 0.001 \text{ \AA}$ при каждом шаге x в интервале $x = 0.0 - 0.5$. Однако в области сосуществования Н и О - фаз длины этих связей также растут на ту же величину. Валентный угол $\angle(\text{O}_1 - \text{Mn}(\text{Fe}) - \text{O}_3)$ растет с ростом концентрации x до 0.5. Далее с ростом x он не изменяется. Угол $\angle(\text{O}_3 - \text{Mn}(\text{Fe}) - \text{O}_4)$ незначительно растет в интервале $x = 0.0 - 0.5$, а правее этого интервала он также не изменяется. И, наконец, валентный угол $\angle(\text{O}_4 - \text{Mn}(\text{Fe}) - \text{O}_4)$ изменяется немонотонно во всем концентрационном интервале.

Длина связи $\text{Yb}_1 - \text{O}_1$ пентагональных бипирамид YbO_7 практически мало изменяется в интервале $x = 0.0 - 0.5$, а длина связи $\text{Yb}_1 - \text{O}_2$ уменьшается. Правее $x = 0.5$ эти обе длины связей растут с ростом x .

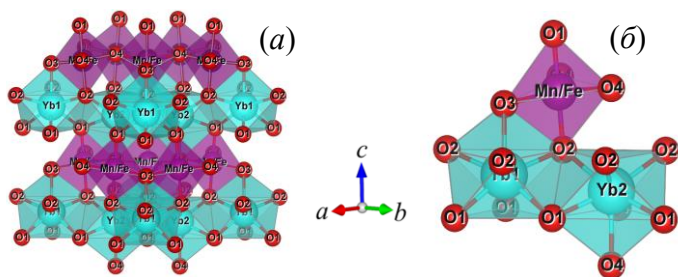


Рис.7- Модельное представление Н-фазы $\text{YbFe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{O}_3$ (а) и ее выделенной части (б)

Длины связей $\text{Yb}_1 - \text{O}_3$ и $\text{Yb}_2 - \text{O}_4$ растут во всем концентрационном интервале с ростом x . Длины связей $\text{Yb}_2 - \text{O}_1$ и $\text{Yb}_2 - \text{O}_2$ второй пентагональной бипирамиды уменьшаются при $x = 0.0 - 0.5$, а при $x > 0.5$ они также растут.

Орторомбическая фаза YbFeO_3 (o-YbFO) представляет собой совокупность кислородных октаэдров FeO_6 и расположенных между ними додекаэдров YbO_8 . Фаза o-YbFO разрешается на дифрактограмме, начиная с $x = 0.6$. Судя по рис.6, одиночная фаза орторомбической сингонии формируется в концентрационном интервале $x = 0.8 - 1.0$. Помимо изменения длин связей с ростом x , для o-YbFO характерны наклоны кислородных октаэдров $\text{MnO}_6/\text{FeO}_6$ вокруг орторомбических осей b и c . Отметим, что наклоны, вращения FeO_6 и изменения длин связей влияют на магнитные, оптические и другие свойства YbFO. Эти данные приведены в **табл.4**.

Табл. 4 - Концентрационная зависимость углов наклона θ° , угла поворота φ° и длин связей октаэдра YbFeO_3 .

x	$\text{Mn/Fe-O}_3, \text{ \AA}$	$\text{Mn/Fe-O}_4, \text{ \AA}$	$\text{Mn/Fe-O}_5, \text{ \AA}$	θ°	φ°
0.6	1.998	2.028	1.995	19.399	12.652
0.7	2.001	2.029	1.997	19.401	12.652
0.8	2.004	2.032	1.999	19.422	12.654
0.9	2.002	2.029	2.004	19.354	12.648
1.0	2.001	2.026	2.005	19.331	12.646

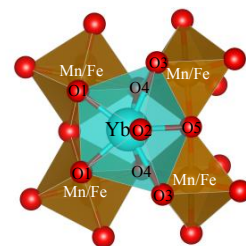


Рис.8 - Модельное представление орторомбической структуры $\text{YbMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$

Как видно из **табл. 4**, чем меньше доля ян – теллеровских ионов Mn^{3+} в $\text{YbFe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{O}_3$, тем больше длина связи $\text{Mn/Fe} - \text{O}_5$ кислородного октаэдра $\text{MnO}_6/\text{FeO}_6$. При этом связи $\text{Mn/Fe} - \text{O}_4$, $\text{Mn/Fe} - \text{O}_3$, углы θ° и φ° изменяются незначительно и немонотонно.

Далее рассмотрена концентрационная зависимость длин связей додекаэдра YbO_8 орторомбической фазы (см.рис.8) [A8]. Номера кислорода с равными длинами связей совпадают. Ион Yb образует с ионами кислорода восемь связей. Из них $\text{Yb} - \text{O}_1$, $\text{Yb} - \text{O}_3$ и $\text{Yb} - \text{O}_4$ имеют по две связи одинаковой длины (с точностью до второго знака после запятой), а $\text{Yb} - \text{O}_2$ и

Yb – O₅ - разные длины связей. Данные соответствующих длин связей Далее рассмотрены длины связей между атомами и валентных углов YbMn_{1-x}Fe_xO₃ при его наноструктурировании под давлением 1 ГПа. концентраций $x = 0.6 - 1.0$ приведены в **табл. 5**. В Н- фазе YbMF представляет собой комбинацию двух неэквивалентно искаженных пентагональных бипирамид и тригональ-

Табл. 5 - Длины связей додекаэдров о-YbMF

x	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Yb-O1, Å	2.230	2.233	2.234	2.235	2.234
Yb-O2, Å	2.200	2.203	2.203	2.205	2.203
Yb-O3, Å	2.660	2.664	2.665	2.671	2.672
Yb-O4, Å	2.473	2.475	2.476	2.479	2.477
Yb-O5, Å	2.249	2.250	2.252	2.249	2.245

ных бипирамид MnO₅/FeO₅. Величины параметров YbO₇ и MnO₅/FeO₅ приведены в **табл. 6**.

Табл. 6 - Линейные и угловые параметры Н - фазы YbMF наноструктурированного при давлении 1 ГПа

x	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
Mn/Fe – O1, Å	1.892	1.875	1.872	1.885	1.887	1.881	1.881	1.897	1.892
Mn/Fe – O2, Å	1.893	1.876	1.873	1.886	1.888	1.882	1.882	1.898	1.894
Mn/Fe – O3, Å	2.030	2.037	2.037	2.032	2.032	2.022	2.025	2.033	2.034
Mn/Fe – O4, Å	2.025	2.031	2.032	2.026	2.026	2.016	2.019	2.027	2.029
Yb1– O1, Å	2.234	2.232	2.232	2.232	2.233	2.223	2.225	2.237	2.237
Yb1– O2, Å	2.287	2.292	2.292	2.287	2.288	2.277	2.280	2.290	2.291
Yb1– O3, Å	2.300	2.279	2.276	2.291	2.294	2.286	2.286	2.305	2.300
Yb2– O1, Å	2.252	2.256	2.256	2.252	2.253	2.242	2.245	2.255	2.256
Yb2– O2, Å	2.270	2.270	2.270	2.269	2.270	2.260	2.262	2.274	2.274
Yb2 – O4, Å	2.433	2.411	2.407	2.423	2.426	2.419	2.420	2.439	2.433
(O1–Mn/Fe–O3)°	92.55	92.38	92.36	92.49	92.50	92.53	92.51	92.57	92.53
(O3–Mn/Fe–O4)°	120.55	120.54	120.54	120.55	120.55	120.55	120.55	120.56	120.55
(O4–Mn/Fe–O4)°	118.58	118.61	118.62	118.59	118.59	118.58	118.59	118.57	118.58

В точке $x = 0.5$ все длины связей имеют минимумы. Отсутствие линейного роста длин связей с ростом концентрации x механоактивированных составов можно объяснить образованием твердых растворов, композита и накапливающимися в составах напряжениями. В интервале концентраций $x = 0.6 - 1.0$ помимо Н-фазы наблюдается и О-фаза. Длины связей, углы θ° и ϕ° кислородных октаэдров Mn/FeO₆ даны в **табл. 7**.

При минимальных значениях длин связей состав с $x = 0.6$ наблюдаются максимальные значения θ° и ϕ° . Увеличение x и переход за правую границу

композита ($x > 0.8$) означает уменьшение концентрации ионов Mn^{3+} , постепенное приближение к «чистой» О – фазе ($YbFeO_3$) и сопровождается с ростом всех длин связей и уменьшением углов θ° и φ° .

Табл. 7 - Параметры октаэдра наноструктурированного $YbMF$.

x	Mn/Fe-O ₃ , Å	Mn/Fe-O ₄ , Å	Mn/Fe-O ₅ , Å	θ°	φ°
0.6	2.000	2.022	1.966	19.754	12.677
0.7	2.001	2.030	1.995	19.419	12.654
0.8	1.998	2.027	1.994	19.405	12.653
0.9	2.003	2.028	2.000	19.400	12.652
1.0	2.007	2.034	2.009	19.354	12.648

Это обусловлено уменьшением внутренних напряжений за счет уменьшения фаз с разницей между параметрами ячеек. В интервале $x = 0.6 - 0.8$ состав представляет собой композит, а в интервале $x = 0.9 - 1.0$ существует только О -фаза. Зависимость длин связей додекаэдров YbO_8 наноструктурированного $YbMF$ от x видно из **табл.8**.

Табл. 8 - Длины связей додекаэдров ортоферрита $YbMF$ наноструктурированного при давлении 1 ГПа.

x	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Yb-O1, Å	2.233	2.232	2.230	2.233	2.241
Yb-O2, Å	2.207	2.202	2.200	2.207	2.211
Yb-O3, Å	2.627	2.661	2.659	2.667	2.678
Yb-O4, Å	2.460	2.474	2.472	2.477	2.485
Yb-O5, Å	2.241	2.251	2.250	2.248	2.254

Максимумы длин связей наблюдаются для концентрации $x = 0.1$. Концентрации $x = 0.8$ соответствуют минимальные значения длин связей. Длины связей $Yb-O_1$ и $Yb-O_2$ уменьшаются с ростом x , а остальные связи растут. Таким образом, внутри концентрационного интервала $x = 0.0 - 1.0$ можно выделить еще одну особую точку $x = 0.8$, являющаяся правой границей композита. Соответствующий ему состав имеет локальные экстремумы не только длин связей додекаэдров, но и параметров элементарных ячеек. На основании полученных результатов и их анализа сформулировано **второе** научное положение, выносимое на защиту.

Глава IV посвящена изучению диссипативных свойств образцов. Изучены температурные зависимости энергий активации процесса переноса заряда всех составов, полученных до и после наноструктурирования порошков, и обнаружены изломы, по которым можно оценить T_N . Методами импедансной спектроскопии, реализованных на различных частотах в широком диапазоне температур, используя диаграммы Коула-Коула и схемы замещения, изучены керамики YbFeO_3 , $\text{YbMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ и $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [A7]. Показано, что емкостная составляющая комплексного сопротивления более чувствительна к максвелл-вагнеровской релаксации, чем активная составляющая. На рис.9 в качестве примера приведены характерные экспериментальная и теоретическая кривые, схема замещения (a) и температурные зависимости подгоночных параметров (a') $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. Обнаружено, что для гетерофазных составов схемы замещения и характер кривых различаются.

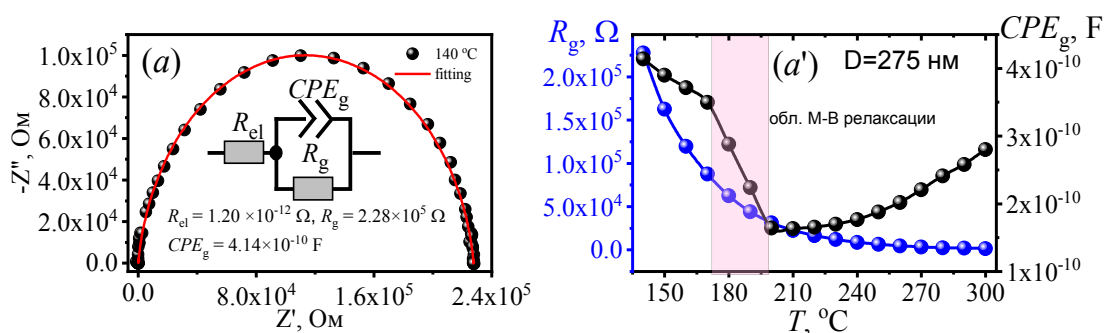


Рис.9- Экспериментальные и теоретические кривые с соответствующей схемой замещения (a) и температурные зависимости подгоночных параметров (a') $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$

По оптическим спектрам поглощения $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, YbFeO_3 и $\text{YbMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ определена ширина запрещенной зоны E_g . E_g $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ уменьшается при уменьшении размера D , E_g YbFeO_3 с ростом давления механоактивации немонотонно изменяется, а E_g $\text{YbMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ с ростом x растет.

Далее изучены ИК- спектры (см.рис.10). Выбранный спектральный интервал ($750\text{-}450 \text{ cm}^{-1}$) был аппроксимирован тремя функциями Гаусса. Уменьшение размера D в результате механической активации приводит к сдвигу влево волновых чисел всех форм колебаний. Значительный сдвиг наблюдается для моды $\nu_1(\text{Yb-O})$ образца, который был механоактивирован

при давлении 750 МПа. Так как колебательный спектр кристаллов во многом определяется их структурным совершенством, наличие как химических, так и структурных дефектов, накопленных в процессе активации, приводит к изменению спектра кристаллов.

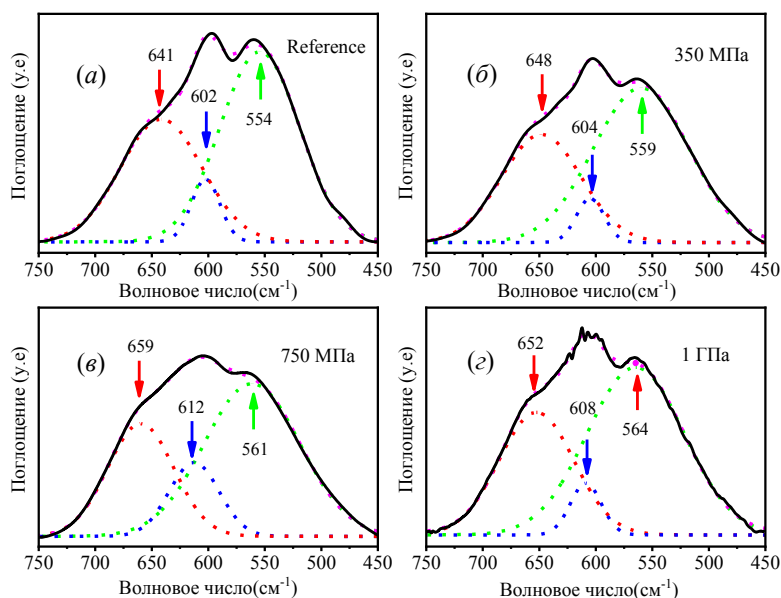


Рис. 10 - ИК- спектры $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ с размером D (а) - 275 нм, (б) - 213 нм, (в) - 75 нм и (г) - 25 нм

Это в свою очередь приводит к изменению силовых констант K . Константы K (см.табл.9) были рассчитаны нами по формуле:

$$K = 4\pi^2 c^2 \nu^2 \mu \quad (1)$$

где, $c = 2.99 \times 10^{10} \text{ cm/s}$, μ - приведенная масса ионов в тетраэдрах, октаэдрах или додекаэдрах, ν - волновое число.

Силовые константы связей $(\text{Yb-O})_d$ и $(\text{Fe-O})_o$ образца с $D = 75$ нм имеют максимальные значения, а силовые константы связи $(\text{Fe-O})_t$ растут монотонно при всех давлениях.

Табл. 9 - Зависимости силовых постоянных и длин связей $(\text{Yb-O})_d$, $(\text{Fe-O})_o$ и $(\text{Fe-O})_t$ от размера D $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$

P , (МПа)	D , (нм)	$(\text{Yb-O})_d$, (cm^{-1})	K_s (Н/см)	$(\text{Fe-O})_o$, (cm^{-1})	K_s (Н/см)	$(\text{Fe-O})_t$, (cm^{-1})	K_s (Н/см)
0	275	641	3.566	602	2.674	554	2.262
350	213	648	3.645	604	2.689	559	2.303
750	75	659	3.769	612	2.761	561	2.320
1000	25	652	3.690	608	2.725	564	2.344

Аналогичные измерения были проведены для наноструктурированных YbFeO_3 .

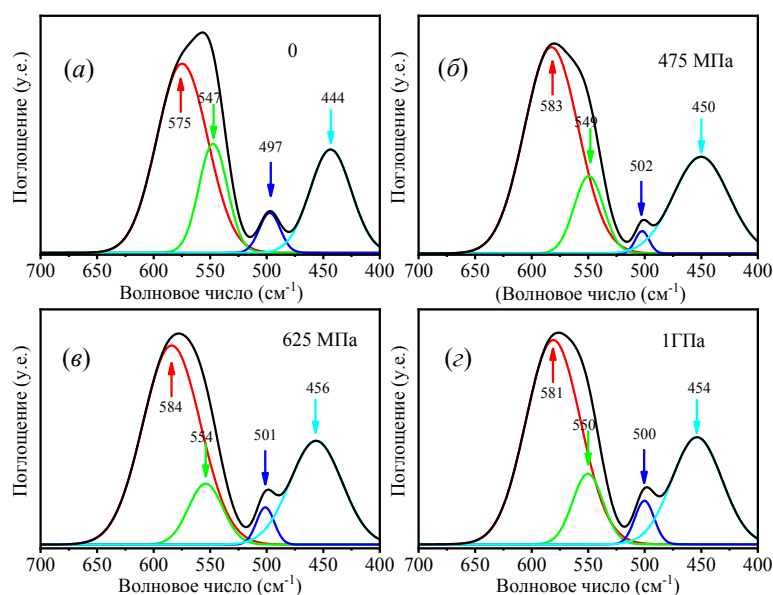


Рис.11- ИК-спектры стартового - (а) и наноструктурированных при давлениях 475 - (б), 625 - (в), 1000 МПа (г) порошков YbFeO_3

Рассмотрим сначала спектр стартового образца YbFeO_3 (см. рис. 11(а)). Моды $\nu \sim 444 \text{ см}^{-1}$ и $\nu \sim 497 \text{ см}^{-1}$ можно отнести к деформационным колебаниям связей Fe-O в октаэдрах FeO_6 . Моды $\nu \sim 547 \text{ см}^{-1}$ и 575 см^{-1} обусловлены валентными колебаниями связей Fe-O в октаэдрах FeO_6 и Yb-O в додекаэдрах YbO_8 соответственно. Это приводит к изменению констант K . Как видно из рис.11, после наноструктурирования моды деформационных и валентных колебаний октаэдра и додекаэдра растут (см. *табл. 10*).

Табл. 10 - Зависимости силовых постоянных длинных связей $(\text{Fe-O})_{\text{ol}}$, $(\text{Yb-O})_{\text{dl}}$, коротких связей $(\text{Fe-O})_{\text{os}}$, $(\text{Yb-O})_{\text{ds}}$ от давления механоактивации

$P, (\text{МПа})$	$(\text{Fe-O})_{\text{os}}, (\text{см}^{-1})$	$K, (\text{Н/см})$	$(\text{Fe-O})_{\text{ol}}, (\text{см}^{-1})$	$K, (\text{Н/см})$	$(\text{Yb-O})_{\text{os}}, (\text{см}^{-1})$	$K, (\text{Н/см})$	$(\text{Yb-O})_{\text{ol}}, (\text{см}^{-1})$	$K, (\text{Н/см})$
0	575	2.437	547	2.205	497	2.144	444	1.711
475	583	2.505	549	2.222	502	2.187	450	1.758
625	584	2.514	554	2.262	501	2.179	456	1.805
1000	581	2.488	550	2.230	500	2.170	454	1.789

Далее в диссертации представлены результаты изучения диэлектрических спектров всех составов (см. рис.12) [A6].

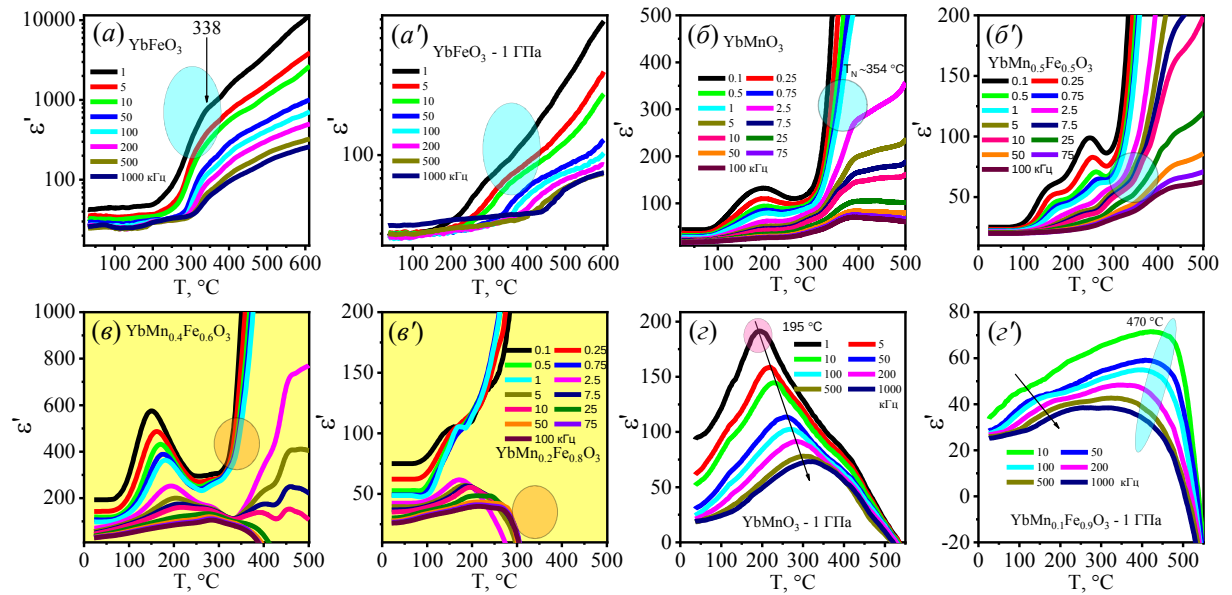


Рис.12- Температурные зависимости диэлектрических спектров составов YbFeO_3 (a,a'), YbMnO_3 (б), $\text{YbMn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{O}_3$ (б'), $\text{YbMn}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}\text{O}_3$ (в), $\text{YbMn}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_3$ (в'), YbMnO_3 (з), $\text{YbMn}_{0.1}\text{Fe}_{0.9}\text{O}_3$ (з')

Кружочки и эллипсы на графиках соответствуют температуре отклика диэлектрической подсистемы на магнитные фазовые переходы.

На основании результатов изучения оптических и ИК- спектров YbFeO_3 $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ сформулировано третье положение, выносимое на защиту.

Далее в диссертации изучены магнитные свойства наноструктурированных составов. Для магнитных наноструктур характерно возникновение неоднородного распределения намагниченности — стохастической (случайной) магнитной структуры при сохранении ферромагнитного порядка на характерных длинах $2R_L$ ($R_L \gg R_C$), где $R_C = D/2$. В этом случае для изучения корреляции структура — свойства можно использовать модель случайной магнитной анизотропии, которая предполагает, что оси легкого намагничивания в отдельных зернах (кластерах) ориентированы случайным образом [2-6]. Закон приближения намагниченности насыщения (ЗПН) является теоретической основой для определения флуктуирующих в пространстве параметров локальной анизотропии [7].

Для кубических поликристаллов со случайной ориентацией осей легкого намагничивания в кристаллитах ЗПН в приближении малых углов и

отсутствия магнитостатического взаимодействия между магнитными моментами кристаллитов имеет вид:

$$M(H) = M_s - (\eta M_s) H^2 \quad (2)$$

где

$$\eta \approx 8/105(K/\mu_0 M_s)^2 \quad (3)$$

Построив зависимость намагниченности $M(H) = f(H^{-2})$ и аппроксимировав эту зависимость линейной функцией, получим соответствующее значение M_s . На рис.13 приведены зависимости петель гистерезиса (а) и графиков H_c , M_r и M_s (б) $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ в от размеров D . Поле анизотропии H_a оценивалось по формуле:

$$H_a = 2K/M_s \quad (4)$$

Полученные результаты приведены в табл.16. При уменьшении среднего размера D до 75 нм M_r и H_c изменяются коррелированно (см. рис. 13(б)), а намагниченность M_s образцов с размерами менее 102 нм изменяется практически в так же, как M_r и H_c . Как показано на рис. 13(б), $H_{c\text{max}}$ соответствует размеру $D = 75$ нм. Этот размер D оказывается критическим размером $D_{\text{crit}(2)}$, характерным для малых частиц, и эта величина имеет разный смысл для разных составов. Поэтому кривые намагничивания ансамблей наночастиц с размерами, близкими к критическому однодоменному размеру, характеризуются наибольшими значениями H_c и M_r .

Дальнейшее уменьшение размера D приводит к уменьшению H_c , M_r и M_s , а суперпарамагнетизм должен наблюдаться при определенном размере частиц $D_{\text{crit}(1)}$, где H_c и M_s равны нулю, что возможно благодаря существованию механизма межзеренного ферромагнитного обменного взаимодействия. Из рис.13(б) следует, что $D_{\text{crit}(1)}$ $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ меньше 25 нм. Механизм межзеренного обменного взаимодействия становится возможным, когда размер зерна D меньше длины обменного взаимодействия.

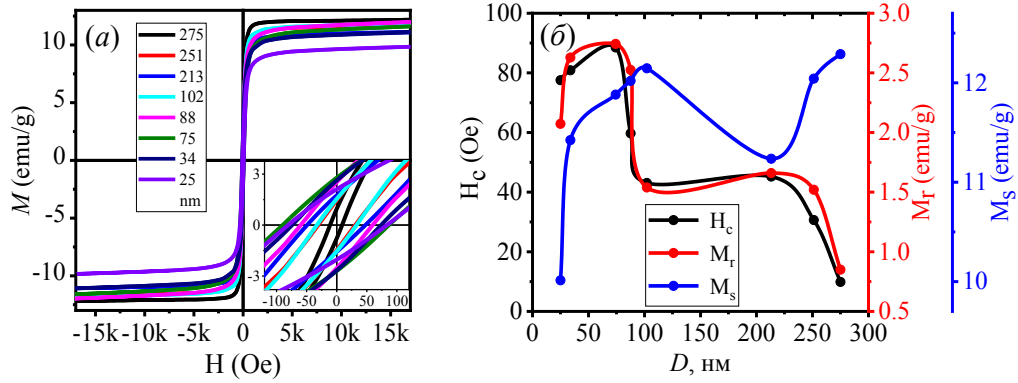


Рис. 13 – Размерные зависимости: (а) - петли магнитного гистерезиса, (б) - коэрцитивного поля H_c , остаточной намагниченности M_r и намагниченности насыщения M_s $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$

Табл.11-Значения размеров D и соответствующие им константы анизотропии

D (нм)	275	251	213	102	88	75	34	25
K (10^4 Дж/м ³)	2.69	2.91	3.03	3.94	4.45	4.53	4.08	3.45
H_a (кЭ)	6.31	6.62	7.62	9.16	10.45	10.75	10.47	10.25

Далее представлены результаты изучения $M(H)$ YbFeO_3 (см.рис.14).

Истинный ход кривой $M(H)$ этого состава описывается формулой:

$$M = M_s \left(1 - \frac{1}{15} \frac{H_A^2}{H^2(H^{3/2} + H_R^{3/2})} \right) + \chi H, \quad (5)$$

где H_R – обменное поле, χH – высокополевого парамагнитный отклик.

В больших полях χH вносит в $M(H)$ достаточно весомый вклад, растущий линейно с ростом магнитного поля H . Состав YbFO является магнито-мягким с коэрцитивным полем $H_c < 100$ Э. Смещение доменов происходит при меньших, чем H_c значениях магнитных полей, и для необратимого вращения магнитных моментов достаточны поля $\sim H_c$. Поэтому важен выбор наиболее подходящей аппроксимирующей функции и подбор подгоночных параметров. Исходя из этих соображений, нами был выбран нижний порог поля равным 200 Э, а верхний - 2кЭ, и проведена подгонка к ЗПН для пяти образцов. В диссертации приведены значения статистических подгоночных параметров k^2 и R^2 для всех образцов. Микроскопические параметры, полученные при подгонке, приведены в **табл. 12**.

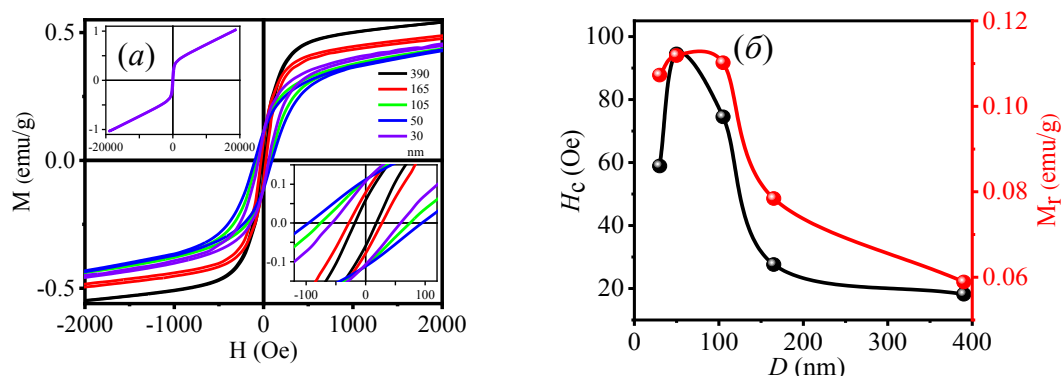


Рис.14- Петли магнитного гистерезиса (а) и размерные зависимости коэрцитивного поля H_c и остаточной намагниченности M_r (б) YbFeO_3

Табл. 12 - Зависимость значений параметров стохастических доменов от размеров кристаллитов YbFeO_3 .

$2R_c$, нм	30	50	105	165	390
H_a , Э	1410	1182	1646	860	883
M_s , у.м.е/г	0.395	0.383	0.378	0.417	0.485
H_R , Э	621	788	723	414	455
χ , 10^{-5} у.м.е/(г·Э)	3.299	3.431	3.453	3.255	3.086
K_{eff} , Дж/м ³	233.4	187.9	258.7	149.8	178.7

Согласно классическим представлениям, величина H_c определяется энергией сопротивления движению доменной стенки, и начиная с величин $\sim 0,1\text{--}1$ мкм уменьшается с увеличением D . При этом процесс намагничивания определяется магнитокристаллической анизотропией отдельных зерен. Связь между H_c и D может быть представлена следующим выражением:

$$H_c \sim D^{-n} \quad (6)$$

где n – теоретически любое положительное число.

Для YbFO такая связь характерна, начиная с 50 nm (см.рис.14). Уменьшение D приводит к нарушению этой связи и уменьшению H_c , т.е. зависимость имеет вид:

$$H_c \sim D^n \quad (7)$$

Это оказывается возможным вследствие существования межзеренного ферромагнитного обменного взаимодействия, что имеет место, когда размер

зерна D оказывается меньше, чем длина обменного взаимодействия L_{ex} . В нашем случае этот параметр равен 50 нм.

Далее изучены зависимости $M(H)$ макроскопического и наноструктурированного $YbMn_{1-x}Fe_xO_3$ и его гальваномагнитные свойства. Приведены зависимости значений параметров стохастических доменов, H_c и M_r микроскопического и наноструктурированного $YbMn_{1-x}Fe_xO_3$ от концентрации x . На основании результатов, полученных главе, сформулировано **четвертое** научное положение.

Основные результаты и выводы:

1. Методом механоактивации получены наноструктурированные составы $Yb_3Fe_5O_{12}$, $YbFeO_3$ и $YbMn_{1-x}Fe_xO_3$ различной степени метастабильности.
2. Обнаружены критические значения размеров D_{crit} наночастиц $YbFeO_3$ и $Yb_3Fe_5O_{12}$, для которых характерны максимальные значения H_c и M_r .
3. Обнаружено, что у наноструктурированных методом «сверху-вниз» составов $YbFeO_3$, $Yb_3Fe_5O_{12}$ и $YbMn_{1-x}Fe_xO_3$ углы наклонов и вращения кислородных октаэдров и длины связей структурных частей существенно отличаются от аналогичных параметров микроскопических составов.
4. Показано, что на параметры, извлекаемых из оптических, инфракрасных и ЭПР-спектров, существенно влияют структурное совершенство и размеры наноструктурных частиц.
5. Рентгендифрактометрическими измерениями $YbMn_{1-x}Fe_xO_3$ установлен концентрационный интервал существования гексагональной, орторомбической фаз и композита.
6. Обнаружено, что зависимости g – фактора и ΔH ЭПР-спектров $YbFeO_3$ и $Yb_3Fe_5O_{12}$ от размеров наночастиц аналогичны зависимостям H_c и M_r от размеров наночастиц.

Список цитируемой литературы

1. Суздалев, И. П. Нанотехнология /И. П. Суздалев // Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М.: КомКнига. - 2006. - С. 592.

2. Herzer, G. Modern soft magnets: Amorphous and nanocrystalline materials / G. Herzer // *Acta Materialia*. - 2013. - Vol. 61, - № 3. - P. 718–734 doi.org/10.1016/j.actamat.2012.10.040.
3. Harris, R. New Model for Amorphous Magnetism / R. Harris, M. Plischke, M. J. Zuckermann // *Physical Review Letters*. American Physical Society, - 1973. - Vol. 31, - № 3. - P. 160–162. doi.org/10.1103/PhysRevLett.31.160.
4. Alben, R. Random anisotropy in amorphous ferromagnets / R. Alben, J. J. Becker, M. C. Chi // *Journal of Applied Physics*. - 1978. - Vol. 49, - № 3. - P. 1653–1658. doi.org/10.1063/1.324881.
5. Chudnovsky, E. M. Ordering in ferromagnets with random anisotropy / E. M. Chudnovsky, W. M. Saslow, R. A. Serota // *Physical Review B*. American Physical Society, - 1986. - Vol. 33, - № 1. - P. 251–261 doi.org/10.1103/PhysRevB.33.251.
6. Ignatchenko, V. A. Spin waves in a randomly inhomogeneous anisotropic medium / V. A. Ignatchenko, R. S. Iskhakov // *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*. - 1977. - Vol. 45. - P. 526.
7. Iskhakov, R. S. Magnetic microstructure of amorphous, nanocrystalline, and nanophase ferromagnets / R. S. Iskhakov, S. V. Komogortsev // *The Physics of Metals and Metallography*. - 2011. - Vol. 112, - № 7. - p. 666–681. doi.org/10.1134/S0031918X11070064.

Список публикаций автора по теме диссертации

- A1. Li, Zhengyou.** Nanostructured $\text{YbMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ and its physical properties / Li. Zhengyou, K. Abdulvakhidov, S. Soldatov, A. Soldatov, S. Otajonov, M. Axmedov, A. Nazarenko, P. Plyaka, B. Abdulvakhidov, V. J. Angadi, et al. // **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**. - 2023. - Vol. 34, - № 15. - P. 1208. https://doi.org/10.1007/s10854-023-10657-7.
- A2.** Abdulvakhidov, K. Structure phase state and physical properties of $\text{YbMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ compositions / K. Abdulvakhidov, **Zhengyou. Li**, B. Abdulvakhidov, A. Soldatov, S. Otajonov, R. Ergashev, D. Yuldashaliyev, B. Karimov, A. Nazarenko, P. Plyaka, et al. // **Applied Physics A**. - 2023. - Vol. 129, - № 3. - P. 185. https://doi.org/10.1007/s00339-023-06469-5.
- A3. Li, Zhengyou.** Influence of structural defects and crystallite size on physical properties of $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ / Li. Zhengyou, K. Abdulvakhidov, A. Nazarenko, A. Soldatov, P. Plyaka, Y. Rusalev, A. Manukyan, I. Dmitrenko, M. Sirota // **Applied Physics A**. - 2022. - Vol. 128, - № 4. - P. 343. https://doi.org/10.1007/s00339-022-05469-1.
- A4. Li, Zhengyou.** Influence of mechanical activation on crystal structure and physical

properties of YbFeO_3 / Li Zhengyou, K. Abdulvakhidov, B. Abdulvakhidov, A. Soldatov, A. Nazarenko, P. Plyaka, A. Manukyan, V. J. Angadi, S. Shapovalova, M. Sirota, et al. // **Applied Physics A.** - 2022. - Vol. 128, - № 12. - P. 1075. <https://doi.org/10.1007/s00339-022-06235-z>.

A5. Li, Zhengyou. Influence of structural defects and crystallite size on physical properties of YbFeO_3 / Li. Zhengyou, K. G. Abdulvakhidov, P. S. Plyaka, M. A. Sirota, M. A. Vitchenko, I. V. Mardasova, E. N. Ubushaeva // 10th anniversary international conference on “Physics and mechanics of new materials and their applications” (PNENMA 2021-2022). Divnomorsk, Krasnodar region, Russia, -P.185 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49332419>.

A6. Li, Zhengyou. The influence of the lattice defects on the magnetic and dielectric behavior in $\text{YbMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ / Li. Zhengyou, K. G. Abdulvakhidov, A.V. Soldatov, D. Ivan, M. A. Sirota, I. V. Mardasova, M. A. Vitchenko, E. N. Ubushaeva, E. Vinokurova // 10th anniversary international conference on “Physics and mechanics of new materials and their applications” (PNENMA 2021-2022), Divnomorsk, Krasnodar region, Russia, - P.183 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49332417&pff=1>.

A7. Li, Zhengyou. The influence of the lattice defects on the physical properties of $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ iron garnet / Li. Zhengyou, K. G. Abdulvakhidov, A.V. Soldatov, D. Ivan, M. A. Sirota, I. V. Mardasova, M. A. Vitchenko, E. N. Ubushaeva, E. Vinokurova // 10th anniversary international conference on “Physics and mechanics of new materials and their applications” (PNENMA 2021-2022), Divnomorsk, Krasnodar region, Russia, - P.184. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49332418&pff=1>.

A8. Li, Zhengyou. Structure and physical properties of $\text{YbMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ compositions / Li. Zhengyou, K. G. Abdulvakhidov, I. V. Mardasova // Physics of ferroelastics. Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia, -P.57-58 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49755915>.