ИОН ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

БУХОРО МУҲАНДИСЛИК – ТЕХНОЛОГИЯ ИНСТИТУТИ

ШАРИПОВ МИРЗО ЗОКИРОВИЧ

СПИН-ҚАЙТА ОРИЕНТАЦИЯЛАНУВЧИ ФАЗАВИЙ ЎТИШЛАР СОҲАСИДА НОДИР ЕР ФЕРРИТ-ГРАНАТЛАРИНИНГ ДОМЕН СТРУКТУРАСИ ВА МАГНИТООПТИК ХОССАЛАРИ

01.04.09 – Магнит ҳодисалари физикаси

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc) ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

ТОШКЕНТ – 2018

УДК: 538.1:548

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации

Contents of the of Doctoral (DSc) Dissertation Abstract

Шарипов Мирзо Зокирович
Спин-қайта ориентацияланувчи фазавий ўтишлар соҳасида нодир ер феррит-гранатларининг домен структураси ва магнитооптик хоссалари 3

Шарипов Мирзо Зокирович
Доменная структура и магнитооптические свойства редкоземельных ферритов – гранатов в области спин – переориентационных фазовых переходов .....……..……..... 27

Sharipov Mirzo Zokirovich
Domain structure and magneto-optical properties of rare - earth ferrites – garnets in the region of spin-reorientation phase transitions. 51

Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ
List of published works ……..……..…….. 55

ИОН ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

БУХОРО МУҲАНДИСЛИК – ТЕХНОЛОГИЯ ИНСТИТУТИ

ШАРИПОВ МИРЗО ЗОКИРОВИЧ

СПИН-ҚАЙТА ОРИЕНТАЦИЯЛАНУВЧИ ФАЗАВИЙ ЎТИШЛАР СОҲАСИДА НОДИР ЕР ФЕРРИТ-ГРАНАТЛАРИНИНГ ДОМЕН СТРУКТУРАСИ ВА МАГНИТООПТИК ХОССАЛАРИ

01.04.09 – Магнит ҳодисалари физикаси

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc) ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

ТОШКЕНТ – 2018

Фан доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий Аттестация комиссиясида B2018.2.DSc/FM68 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Бухоро муҳандислик-технология институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (www.iplt.uz) ва «ZiyoNet» Ахборот таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:	**Джураев Даврон Рахмонович** физика-математика фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	**Мукимов Комил Мукимович** физика-математика фанлари доктори, академик
	Азаматов Закиржан Тахирович физика-математика фанлари доктори, профессор
	Ибрагимова Эльвира Мемедовна физика-математика фанлари доктори, профессор
Етакчи ташкилот:	**Самарқанд давлат университети**

Диссертация ҳимояси Ион плазма ва лазер технологиялари институти ҳузуридаги DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «____»_____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33 -уй. Тел./факс: (+998-71) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz).

Диссертация билан Ион-плазма ва лазер технологиялари институти Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (___ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33 -уй. Тел./факс: (+998-71) 262-32-54.

Диссертация автореферати 2018 йил «____» _____ да тарқатилди.

(2018 йил «____» _____ даги ____ рақамли реестр баённомаси).

Х.Б. Ашуров
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
раиси, т.ф.д., катта илмий ходим

Д.Т. Усманов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
илмий котиби, ф.-м.ф.н.

С.А. Бахрамов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
қошидаги илмий семинар раиси,
ф.-м.ф.д., профессор, академик

КИРИШ (Фан доктори (DSc) диссертация аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда жаҳонда спин электрониканинг энг асосий муаммоси – магнитланувчанлик кўринишидаги ахборотни электр кучланишига алмаштиришдир. Ҳозирги вақтда ушбу муаммо гигант магнит қаршилик ҳодисасидан фойдаланиб ечилмоқда. Магнитоэлектрик эффектлар ушбу муаммо ечимининг альтернатив усули бўлиб гигант магнит қаршилиги ҳодисасига асосланиб ишлайдиган спин – электроника қурилмаларига рақобатни юзага келтирмоқда. Келгусида ток зичлигини ошириш оқибатида ҳаддан ташқари иссиқлик чиқишининг олдини олувчи магнитоэлектрик ҳодисалардан фойдаланиб ахборотни электр токи ёрдамида ёзишдан воз кечиш имкониятини очиб бериш, бу йўналишдаги муҳим вазифалардан бири бўлиб қолмоқда.

Ҳозирги вақтда дунёда, янги авлод спин электрониканинг жадал ривожлантириш, магнитоэлектрик эффектлар асосида ишловчи спин электроника қурилмалари ва асбоблари учун элемент база сифатидаги материалларда ахборотни термомагнит ёзиш, сақлаш ва ҳисоблаш хусусиятларига катта аҳамият берилмоқда. Жумладан нодир ер феррит-гранатлари (НЕФГ)да катта флексомагнитоэлектрик эффектлар (бир жинсли бўлмаган магнитоэлектрик эффект) хона ҳароратида ҳам кузатиш, ферримагнетикларнинг эпитаксиал қатламларидаги домен чегараларини унчалик катта бўлмаган бир жинсли электр майдони воситасида бошқариш, феррит-гранатлар домен структураларининг параметрлари ва хоссаларини чуқур тадқиқ этиш замонавий материалшунослкнинг муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Республикамизда мазкур соҳада салмоқли илмий тадқиқот ишлари олиб борилди, хусусан, замонавий магнитооптик материалшунослик соҳасига алоҳида эътибор қаратилди. Материалнинг домен структураси нотурғун ва домен чегаралари харакатчанлиги кескин ўзгарувчи нодир ер феррит гранатларининг магнит ориентацион фазавий ўтишлар соҳасидаги домен структураси ўрганилди, бунда фазавий ўтишлар яқинида ташқи таъсир (босм, электр ва магнит майдони) лар домен структурасига кўрсатадиган таъсир ҳал қилувчи ахамиятга эгалиги аниқланди ва материал домен конфигурациясини нисбатан кичик майдонлар воситасида бошқариш имкониятини очиб берди. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясига кўра илмий ва инновация ютуқларини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратиш, шу жиҳатдан спин электроника соҳасида магнит материалларнинг домен тузилиши ташқи таъсирлар ёрдамида режали бошқариш ва магнитооптик хусусиятларини чуқур таҳлил қилиш жуда муҳим ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ–2772 -сон «2017–2021 йилларда электротехника саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги Қарори ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини

ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисидаги»ги Қарорини ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши устувор йўналишларига боғлиқлиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг: II. «Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик» устувор йўналишига мувофиқ бажарилди.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи[1]. Магнетиклардаги спин қайта ориентацияланувчи фазавий ўтишлар ва магнитооптик хоссаларининг турли йўналишлари бўйича жахондаги етакчи илмий тадқиқот марказлари ва олий таълим муассаларида, жумладан: the center for materials Research and analysis, University of Nebraska (АҚШ), the department of Materials Science and Engineering (Тел Авив, Исроил), the institute de Ci'encia de materials de Barcelona (Испания), М.В.Ломоносов номидаги Москва давлат университети (Россия), Россия фанлар академияси А.Н.Прохоров номидаги умумий физика институти, Харьков қуйи ҳароратли физика-техника институти (Украина) ва Ўзбекистон Миллий университетида изланишлар олиб борилмоқда.

Спин-қайта ориентацияланувчи фазавий ўтишлар соҳасида нодир ер феррит-гранатлар домен структурасининг ўзгаришини ва магнитооптик хоссалари тадқиқ қилишда жаҳон миқёсида бир қанча муҳим илмий натижалар олинган: феррит-гранат плёнкалари домен чегараларини магнито-электрик бошқариш усуллари ишлаб чиқилган (Москва давлат университети, Россия); магнитоэлектрик эффектларнинг магнитоэлектроника қурилмаларига қўллаш асослари аниқланган (University of Nebraska, АҚШ); нодир ер феррит гранатларида спонтан фазавий ўтишларнинг янги усули ишлаб чиқилган (Донецк миллий университети, Украина); мультиферроикларнинг магнитланувчанлиги ва магнитоэлектрик эффектларнинг ўзаро боғлиқлик аниқланган (Россия фанлар академияси А.Н.Прохоров номидаги умумий физика институти, institute de Ci'encia de materials de Barcelona, Испания); магнетикларда спин қайта ориентацияланувчи фазавий ўтишларнинг айрим хусусиятлари ишлаб чиқилган (Бошқиристон давлат университети, Россия); магнит тизимларда турли фазавий ўтишларни бир қанча моделлаштириш усуллари яратилган (Россия фанлар академияси физика институти); мураккаб магнит қатламли структуралар домен чегараларининг ўзгариш усуллари ва магнит хоссалари аниқланган (Челябинск давлат университети, Россия) ва спин-қайта ориентацияланувчи фазавий ўтишлар соҳасида нодир ер феррит-гранатларининг домен структураси ва магнитооптик хоссалари ўрганилган (Ўзбекистон миллий университети ва Бухоро давлат университети).

[1]Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқот шарҳи қуйидаги манбалар асосида олиб борилди: https://journals.aps.org, https://ufn.ru, https://www.elsevier.com, https://apps.webofknowledge.com, iopscience.iop.org, journals.ioffe.ru, Web of Science, Scopus, Springer. Research Gete ва бошқа адабиёт манбаларидан.

Ҳозирги вақтда жаҳонда нодир ер феррит-гранатларининг домен структураси ва магнитооптик хоссалари тадқиқ қилиш борасида катта потенциалга эга магнетиклар спин-қайта ориентацияланувчи фазавий ўтишларини ўрганувчи илмий тадқиқот ишлари олиб борилган: спин электроникада; нано магнитизмда; магнит микроэлектроникада; амалий магнитооптикада; кичик ўлчамли тизимлар нанотехнологиясида; замонавий материалшуносликнинг сенсор қурилмаларида ва энергомустақил хотира элементларида.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳозирги вақтда нодир ер феррит грантатларининг хона ҳароратидаги домен структураси экспериментал ва назарий жихатдан етарлича тадқиқ этилган. Нодир ер феррит-гранатларида олиб борилган ушбу тадқиқот натижалари (асосан эпитаксиал магнит қатламлар) тола ва интеграл оптика турли қурилма ва асбобларининг базавий элементи сифатида (В.В.Рандошкин и А.Я.Червоненкис), шунингдек магнит микроэлектроника соҳаларида кенг қўлланилган (А.Бобек, Е.Дела-Торре). Нодир ер феррит-гранатлари кубик симметрияга эга бўлганлиги сабабли доменлардаги спонтан магнитланувчанлик вектори бир неча йўналишда жойлашиши мумкин. Нодир ер феррит-гранатларининг бу ўзига хос магнит кўп ўқлилиги улардаги домен конфигурацияларининг турлича бўлишига олиб келган ва тадқиқ этиладиган намуналарнинг кристалографик ориентациясига боғлиқ бўлган.

Нодир ер феррит-гранат домен структураларини тадқиқ этишда ферримагнетиклар эпитаксиал қатламларидаги домен чегаралари жойлашувини бир жинсли бўлмаган электр майдони ёрдамида бошқариш (флексомагнитоэлектрик эффект) рус олимлари А.С. Логгинов, Г.А. Мешков, А.В. Николаев ва А.П.Пятаков томонидан кашф қилингандан кейин айниқса кескин ривожланган. Бу эса Москва давлат университети олимлари А.К. Звездин ва А.П. Пятаков томонидан флексомагнитоэлектрик эффектдан фойдаланган ҳолда спин электроникаси асбобларининг янги авлодини ишлаб чиқиш истиқболи-ни очиб берган.

Шу билан биргаликда нодир ер феррит-гранат домен чегараларининг кўплаб хусусиятлари ҳозирга қадар кам ўрганилганлиги В.В.Волков ва В.А.Боков томонидан аниқланган, жумладан муҳим ахамиятга эга бўлган ва магнит микроэлектроникаси асбобларининг тез ишлашини белгилаб берувчи домен чегараларининг ҳаракатчанлиги нодир ер феррит-гранатларда мавжуд домен чегаралари динамикаси назариясидан келиб чиқувчи натижадан ўнлаб марта кичиклиги белгиланган.

Шунингдек нодир ер феррит гранатларининг магнит компенсация ҳарорати яқинидаги хусусиятлари очиқлигича қолмоқда. Нодир ер феррит-гранатларнинг магнит компенсация ҳарорати нуқтасидан ўтишда домен структураларни эволюцияси амалда экспериментал тарзда тадқиқ этилмаган ва мавжуд назариялар ҳарорат магнит компенсация ҳароратига яқинлашганида ($T \to T_c$) бир қийматли натижага олиб келмаган, жумладан украиналик олимлар В.Г. Барьяхтар, А.Н.Богданов ва Д.А.Яблонский томонидан $T \to T_c$ кристалнинг магнитостатик энергияси нолга интилганлиги учун энергетик нуқтаи назардан домен структуранинг мавжудлиги фойдали бўлмай қолиши

ва бунинг оқибатида T_c ҳарорат атрофидаги бирор ҳарорат оралиғида доменлар орасидаги чегаралар йўқолиши ва кристалл доменсиз бир жинсли магнитланган ҳолатга ўтиши кўрсатилган.

Аммо нодир ер феррит-гранталарнинг магнит ҳолатини тавсифловчи *H-T* – диаграммага кўра компенсация ҳарорати яқинида темир ва нодир ер панжараларидаги магнит моментларининг бир бирига нисбатан кесишма бурчак ҳосил қилган ҳолдаги жойлашуви энергетик нуқтаи назардан афзалроқ бўлган. Демак бу ҳолда $T \to T_c$ магнит кристалдаги домен чегаралар ва демак домен структуралар ҳам мавжуд бўлиши лозимлиги келиб чиқиши К.П. Белов, А.К. Звездин, А.М. Кадомцева ва Р.З. Литвинов томонидан аниқланган.

Ўзбекистонлик олимлар, айниқса академик К.М. Мукимов, проф. У.В. Валиев, проф. Д.Р. Джураев ва ф-м.ф.д. Б.Ю. Соколов томонидан турли магнит кристаллар ва нодир ер феррит-гранталарнинг магнитооптик хусусиятлари ва домен тузилишини ўрганиш бўйича экспериментал ва назарий тадқиқотлар олиб борилган. Нодир ер феррит-гранталар домен структураларининг магнит ориентацион фазавий ўтишлардаги эволюциясига алоқадор юқоридагига ўхшаш қатор ҳал қилинмаган масалалар мазкур диссертация ишининг асоси бўлиб хизмат қилган ва унинг тадқиқот мавзусини белгилаб берган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Мазкур диссертация иши Бухоро муҳандислик-технология институтида олиб борилган ёш олимларнинг ЁФ2-ОТ-0-19724, ЁФ2-4 «Кучсиз ферромагнетикларда фотомагнит ҳодисалар» (2014-2015), ЁФ2-1 «Ориентацион ўзаро таъсирни инобатга олган ҳолда феррит гранатларнинг магнитооптик хоссалари ва фазавий ўтишларини тадқиқ этиш» (2016-2017) фундаментал илмий лойихалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади нодир ер феррит-гранатларнинг магнит ориентацион фазавий ўтишлардаги домен структураларининг ўзгариш қонуниятларини аниқлаш ҳамда домен структурасининг бу ўзгаришлари билан боғлиқ магнит материалнинг амалий тавсифлари (домен чегараларининг ҳаракатчанлиги, магнит қабул қилувчанлик, коэрцитив куч ва ҳ.к.) ўзгаришини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

$Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ феррит гранатининг енгил магнитланувчанлик ўқи йўналишини спонтан қайта ориентациялашда уларнинг домен структураси эволюциясини тўғридан тўғри визуал кузатиш;

$Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ феррит гранатининг бошланғич магнитооптик қабул қилувчанлиги ҳамда Фарадей эффекти магнит гистерезисининг ҳароратга боғлиқлигини аниқлаш;

$Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ феррит гранати домен структурасининг спонтан спин қайта ориентациялаш ҳарорати оралиғида домен структурасининг қайта шаклланишини тавсифловчи моделни ишлаб чиқиш;

$Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ феррит гранати домен структурасининг ҳамда спонтан Фарадей эффектининг унда ҳосил қилинган планар икки ўқли механик

кучланиш таъсирида юзага келувчи ориентацион фазавий ўтишда ҳароратга боғлиқлигини экспериментал кузатиш;

$Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ феррит гранатида кузатилувчи ориентацион фазавий ўтишни икки ўқли кучланишли кубик кристалл термодинамик потенциалига асосланган феноменологик назариясини ривожлантириш;

$Tb_3Fe_5O_{12}$ феррит гранатининг домен структураларини магнит компенсация ҳароратини ўз ичига олувчи кенг ҳароратлар интервалида экспериментал равишда кузатиш;

$Tb_3Fe_5O_{12}$ феррит гранатининг бир доменли ва кўп доменли ҳолатларини ажратувчи H-T – диаграммани экспериментал тарзда аниқлаш;

$Tb_3Fe_5O_{12}$ феррит гранатида кузатиладиган техник магнитланиш жараёнига T_c ҳарорат яқинида кристаллнинг домен структураси муҳим таъсир кўрсатишини аниқлаш;

$Tb_3Fe_5O_{12}$ феррит гранатида экспериментал кузатилган магнит компенсация нуқтаси орқали ўтувчи ҳароратларда техник тўйиниш майдонининг катталиги ва магнит гистерезис илмоғи шаклини ўзгаришини тавсифлаш имконини берувчи, кристалл панжара дефектида домен чегаралари пинингини ҳисобга олган T_c ни ўз ичига олган ҳароратлар соҳасида содир бўлувчи НЕФГ техник магнитланиш жараёнини тавсифловчи назарияни ишлаб чиқиш;

$Tb_3Fe_5O_{12}$ феррит гранатидаги домен чегараларининг T_c компенсация ҳарорати атрофида қуйи частотали ишораси ўзгарувчан магнит майдон таъсиридаги силжиш катталигининг ҳароратга боғлиқлигини магнитооптик усуллар ёрдамида ўрганиш;

$Tb_3Fe_5O_{12}$ феррит гранати T_c га ҳарорат яқинлашганда домен чегаралари силжиш катталигининг ҳароратга боғлиқлик тавсифини аниқлаш;

магнит компенсация ҳароратини ўз ичига олувчи ҳароратлар оралиғида ишораси ўзгарувчан магнит майдон таъсирида юзага келувчи домен чегараларининг қуйи частотали резонансини тавсифловчи феноменологик назарияни ривожлантириш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида 100 мкм қалинликга эга ва сиртлари (111) ва (110) кристалографик текисликларга параллел жойлашган нодир ер феррит-гранатларнинг соф (аралашмасиз) $Tb_3Fe_5O_{12}$, $Dy_3Fe_5O_{12}$ ва $Ho_3Fe_5O_{12}$ феррит гранатлари, ҳамда аралашмали иттрий-тербийли $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ ва иттрий-гольмийли $Ho_{0.6}Y_{2.4}Fe_5O_{12}$ феррит - гранатлари танланган.

Тадқиқотнинг предмети нодир ер феррит гранат монокристалларидаги магнит спин-қайта ориентацияланувчи фазавий ўтишлар, ушбу фазавий ўтишлар оқибатидаги домен структураларини ўзгаришидир. Шунингдек магнит хусусиятлари яъни коэрцитив куч, домен чегараларининг ҳаракатчанлиги, гистерезис эгри чизиғининг шакли, магнит қабул қилувчанлигидир.

Тадқиқотнинг усуллари. Диссертация ишида қуйидаги усуллар қўлланилган: домен структураларини магнитооптик визуаллаштириш усули, магнит қабул қилувчанликни, магнит гистерезис эгри чизиғини, домен чегараларининг динамикасини ўрганувчи Фарадей эффекти усули, қутбловчи микроскоп ёрдамида визуаллаштириш усули, магнит қабул қилувчанликнинг ҳароратга боғлиқлигини, домен чегараларининг силжишини, магнит

гистеризис эгри чизиғини аниқловчи товуш частотаси билан гармоник қонун бўйича ўзгарувчи ўзгарувчан магнит майдонида стандарт интенсивлик усули.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги:

$Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ феррит гранати домен структурасининг енгил магнитланувчанлик ўқи йўналишидаги спонтан қайта ориентацияланишидаги эволюцияси биринчи марта тўғридан тўғри визуал топилган ва фазавий ўтиш яқинидаги ҳароратда кристаллнинг магнитооптик қабул қилувчанлиги тор кескин максимумга эга эканлиги, коэрцитив кучнинг эса камайиши аниқланган;

$Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ феррит гранати домен структурасининг енгил магнитланиш ўқи спонтан қайта оринтациялаш ҳарорати оралиғида қайта шаклланишини тавсифловчи модель ишлаб чиқилган;

биринчи марта кубик симметрияга эга ферримагнетикларда икки ўқли механик кучланишлар таъсирида ҳосил қилинган магнит ориентацион фазавий ўтиш аниқланган;

нодир ер феррит-гранатларда механик кучланишлар ҳосил қилган ориентацион фазавий ўтишнинг феноменологик назарияси термодинамик потенциал асосида ривожлантирилган;

нодир ер феррит-гранат домен структураларининг магнит компенсация ҳароратини ўз ичига олувчи ҳароратлар соҳасидаги домен структураси биринчи марта тажрибада кузатилган, ҳамда айрим мавжуд назарияларга зид ўлароқ ташқи магнит майдони бўлмаганда кристалл магнит компенсация ҳароратида ўз домен структурасини сақлаши аниқланган;

$Tb_3Fe_5O_{12}$ феррит гранатида магнит компенсация ҳарорати яқинида кристаллнинг домен структураси техник магнитланувчанлик жараёнига жиддий таъсир кўрсатиши аниқланган ва ферримагнит кристаллнинг магнит компенсация ҳароратини ўз ичига олувчи ҳароратлар соҳаси учун техник магнитланувчанлик жараёнини тавсифловчи модель ишлаб чиқилган;

нодир ер феррит-гранат домен чегараларининг қуйи частотали ишораси ўзгарувчан магнит майдонидаги динамикаси магнит компенсация ҳарорати яқинида биринчи марта аниқланган;

нодир ер феррит-гранат домен чегараларининг қуйи частотали ишораси ўзгарувчан магнит майдонидаги резонансини тавсифловчи феноменологик назарияси магнит компенсация ҳарорати яқинида ривожлантирилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

$Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ феррит гранатларининг спонтан спин қайта ориентацияланиш ҳарорати соҳасидаги бошланғич магнитооптик қабул қилувчанлиги ва Фарадей эффекти магнит гистерезисининг ҳароратга боғлиқлиги аниқланган ҳамда $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ феррит гранатининг унда икки ўқли планар механик кучланишлар ҳосил қилган ориентацион фазавий ўтишдаги домен структурасининг ўзгариши аниқланган;

$Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ феррит гранати домен структурасининг енгил магнитланувчанлик ўқи йўналишидаги спонтан қайта ориентацияланишидаги эволюциясининг экспериментал кузатилган, $Tb_3Fe_5O_{12}$ феррит гранатида бир доменли ва кўп доменли ҳолатларни ажратувчи магнит фазавий *H-T* –

диаграмма ва $Tb_3Fe_5O_{12}$ феррит гранатида магнит компенсация ҳарорати яқинида унинг домен структурасининг техник магнитланувчанлик жараёнига ўзига хос таъсири кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги нодир ер феррит-гранат кристалларини тавсифловчи асосий магнит характеристикалар ва домен структураларининг замонавий магнитооптик усуллар комплекси ёрдамида тадқиқ этилганлиги билан таъминланган; шунингдек турли усуллар ёрдамида олинган тажриба натижаларнинг ўзаро мос келиши ва назарий хисоблашларга мувофиқлиги билан; ўлчаш хатоликларининг таҳлили билан; олинган натижаларнинг умум физик тасавурларга мослиги ва адабиётлардаги натижаларга мос келиши билан белгиланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти нодир ер феррит гранатларининг спин қайта ориентацияланишини тавсифловчи натижалар магнит доменлар физикаси ҳақидаги замонавий тасаввурларни кенгайтиради ҳамда магнит ориентацион фазавий ўтишлар назариясининг қатор фаразларини аниқлаштиради ва биринчи марта кузатилган нодир ер феррит-гранат домен чегараларининг магнит компенсация ҳарорати яқинида ўзгарувчан магнит майдони таъсиридаги қуйи частоталар резонанси, ферримагнит кристаллардаги флексомагнитоэлектрик ўзаро таъсир назариясини ва кўп ўқли магнетиклардаги домен чегаралари динамикаси назариясини ривожлантиради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундаки, нодир ер феррит-гранатларнинг магнит спин қайта ориентацияланиш фазавий ўтишлардаги домен структураси қайта шаклланиши қонуниятлари ҳамда магнит қабул қилувчанлик, коэрцитив куч, домен чегараларининг ҳаракатчанлиги каби хоссаларининг ўзгариши магнит микроэлектроника қурилмаларини ишлаб чиқишда қўллаш ва ахборотни термомагнит усулда ёзиш ёки ўчиришга асосланган асбобларда қўллаш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Нодир ер феррит-гранатларнинг спин-қайта ориентацияланувчи фазавий ўтишлар соҳасидаги домен структураси ва магнитооптик хоссалари асосида:

магнит компенсация нуқтаси яқинида тербий – феррит гранат магнит фазавий диаграммаси №АААА-А17-117021310366-5 рақамли «Фазовые переходы, магнитотранспортные, магнитокалорические и магнитоэлектрические явления в сильнокоррелированных электронных системах» илмий лойиҳада мураккаб магнит тизимларда магнит ва таркибий фазавий ўтишларни аниқлашда қўлланилган (Россия Фанлар академияси Х.И. Амирханов номидаги физика институтининг 2018 йил 16 майдаги 17241/57-сон маълумотномаси). Илмий натижадан фойдаланиш магнит компенсация нуқтаси яқинида нодир ер феррит-гранатлар магнит ҳолатини тавсифлаш имкониятини берган;

критик ҳароратлар яқинидаги Фарадей эффектининг ҳароратга боғлиқлиги ва ривожлантирилган феноменологик назария РНФ 14-22-00279 рақамли «Фундаментальные поисковые исследования в области магнетизма,

фазовых превращений, магнитоэлектроники и микросистемной техники» илмий лойиҳада магнит ва таркибий ўтишларни аниқлашда қўлланилган (Россия Фанлар академияси В.А.Котельников номидаги радиотехника ва электроника институтининг 2018 йил 4 апрелдаги 11210-2173-220-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш магнетикларда спин-қайта ориентацияланувчи фазавий ўтишларни ўрганиш имкониятини берган;

ишлаб чиқилган спин қайта ориентацияланиш ҳарорати сохасидаги $Tb_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$ феррит-гранат домен тузилишининг ўзгариш модели Рузаев шинашуносли институтининг ўта-ўтказувчанлик ва машинасозлик саноати лабораториясида конструктив элементларнинг кучланишли ҳолатини аниқлашда фойдаланилган (Рузаев машинасозлик институтининг 2018 йил 10 апрелдаги № 20-01-722-сон маълумотномаси, Россия). Илмий натижадан фойдаланиш конструктив элементлар кучланишли ҳолатини таҳлил қилиш имкониятини берган;

магнит компенсация ҳароратини ўз ичига олувчи ҳароратлар соҳасида олинган ферримагнит кристалл техник магнитланиш жараёни модели Ф2-ФА-0-83921/Ф2-ФА-Ф0383 рақамли «Сильно корреляционные взаимодействия в сверхпроводниках и магнитных материалах и их критические параметры» (2012-2016) лойиҳада магнит материалларни критик параметрларини ҳисоблашда қўлланилган. (Олий ва ўрта-махсус таълим вазирлигининг 2018 йил 11 апрелдаги № 89-03-1371-сон маълумотномаси). Илмий натижадан фойдаланиш ўта-ўтказгичларда кучли корреляцион ўзаро таъсирларни ҳисоблаш имкониятини яратган;

кубик ферримагнетикларда икки ўқли механик кучланиш таъсиридаги магнит ориентацион фазавий ўтишлар ОТ-Ф2-64 рақамли «Флуктуационные и параметрические явления в конденсированных и нано-размерных системах» (2017-2020) лойихада макроскопик тизимларда эркин энергия ифодасини олишда қўлланилган. (Олий ва ўрта-махсус таълим вазирлигининг 2018 йил 11 апрелдаги № 89-03-1371-сон маълумотномаси). Илмий натижадан фойдаланиш ишлаш принципи магнит структуралар домен конфигурациялар ўзгаришига асосланган, магнит микроэлектроника қурилма ва жиҳозларини ишлаб чиқаришда қўлланилиши мумкинлиги кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг натижалари 21 та халқаро ва 13 та республика илмий-амалий анжуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 64 та илмий иш чоп этилган бўлиб, шулардан 1 монография, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертацияларининг асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия қилинган нашрларда 16 та мақола нашр қилинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса ва 134 номдаги фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва 29 та расмдан иборат. Диссертациянинг ҳажми 200 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурияти асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг биринчи боби **«Нодир ер феррит гранатларининг асосий физикавий хоссалари, кристалларнинг магнит тартибланиш турлари, магнит ориентацион фазавий ўтишлар»** деб номланиб, ушбу бобда магнит ориентацион фазавий ўтишларни тавсифловчи Ландау назарияси, кристалларнинг магнит тартибланиш турлари, НЕФГ нинг кристалл ва магнит структураси, домен структураси, магнит, оптик ва магнитооптик хоссалари, домен чегараларининг динамикасига бағишланган назарий ва экспериментал ишларнинг шарҳи келтирилган. Ўтказилган адабиётлар шарҳи асосида НЕФГ муҳим илмий ва амалий ахамиятга эга ўзига хос физикавий хоссаларга эга эканлиги ҳақидаги хулосага келинган. Шунинг учун НЕФГ даги ориентацион фазавий ўтишларни тадқиқ этиш долзарб муаммо эканлиги асосланган.

Иккинчи боб **«Нодир ер элементларининг асосий таснифлари, тажриба қурилмалари ва тадқиқот усуллари»** деб номланган. Унда тажрибада қўлланиладиган қурилмалар, усуллар ҳамда тадқиқ этиладиган намуналар ҳақида батафсил маълумотлар келтирилган, улар воситасида НЕФГ нинг домен структуралари, магнит ва магнитооптик хоссалари ўрганилган.

Экспериментларда НЕФГ нинг соф монокристаллари $Tb_3Fe_5O_{12}$, $Dy_3Fe_5O_{12}$ ва $Ho_3Fe_5O_{12}$, шунингдек аралашмали иттрий тербий $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ ва иттрий гольмий $Ho_{0.6}Y_{2.4}Fe_5O_{12}$ гранатлари ҳам фойдаланилган бўлиб улар эритмадан қотишма кўринишида спонтан кристалланиш усули ёрдамида олинган. Бу НЕФГ нинг танланишига сабаб уларда қатор ўзига хос хусусиятларнинг мавжудлигидир: соф монокристаллар $Tb_3Fe_5O_{12}$, $Dy_3Fe_5O_{12}$ ва $Ho_3Fe_5O_{12}$ суюқ азотнинг қайнаш температурасидан юқори бўлган магнит компенсация ҳароратига эга; $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ 100 К дан юқори бўлган спонтан спин қайта ориентацияланиш ҳароратига эга, $Ho_{0.6}Y_{2.4}Fe_5O_{12}$ эса нисбатан кичик магнит анизотропияга эга. Бу хусусиятлар НЕФГ даги магнит ориентацион фазавий ўтишларни бизнинг экспериментал шароитларимизда ўрганиш имкониятини беради. Тадқиқ этилган намуналар қалинлиги 100 мкм, кўндаланг ўлчамлари – 2 х 3 мм бўлган ясси параллел пластинкалар шаклида бўлиб, уларнинг сиртлари (110) ёки (111) йўналишидаги кристалографик текисликларга параллелдир.

Намуналарнинг домен структураси (ДС) қутбловчи микроскоп ёрдамида стандарт магнитооптик усул воситасида визуаллаштириш орқали тадқиқ этилди. Бунда тадқиқ этилган кристалл микроскопнинг фокал текислигига

шундай жойлаштириладики барча доменлардаги спонтан магнитланувчанлик векторининг проекцияси тушувчи нур йўналишида бўлади. Домен структураси тасвирининг контрастлиги қўшни доменлардаги фарадей бурилишининг миқдори ёки ишораси билан белгиланади.

Ишлаб чиқилган экспериментал қурилма Фарадей эффектининг майдон ва температурага боғлиқлигини $H \leq 120$ Э бўлган магнит майдон кучланганлиги чегарасида, бошланғич магнитооптик қабул қилувчанлигини $H_0 \leq 60$ Э бўлган қуйи частотали майдон ёрдамида тадқиқ этиш имкониятини беради.

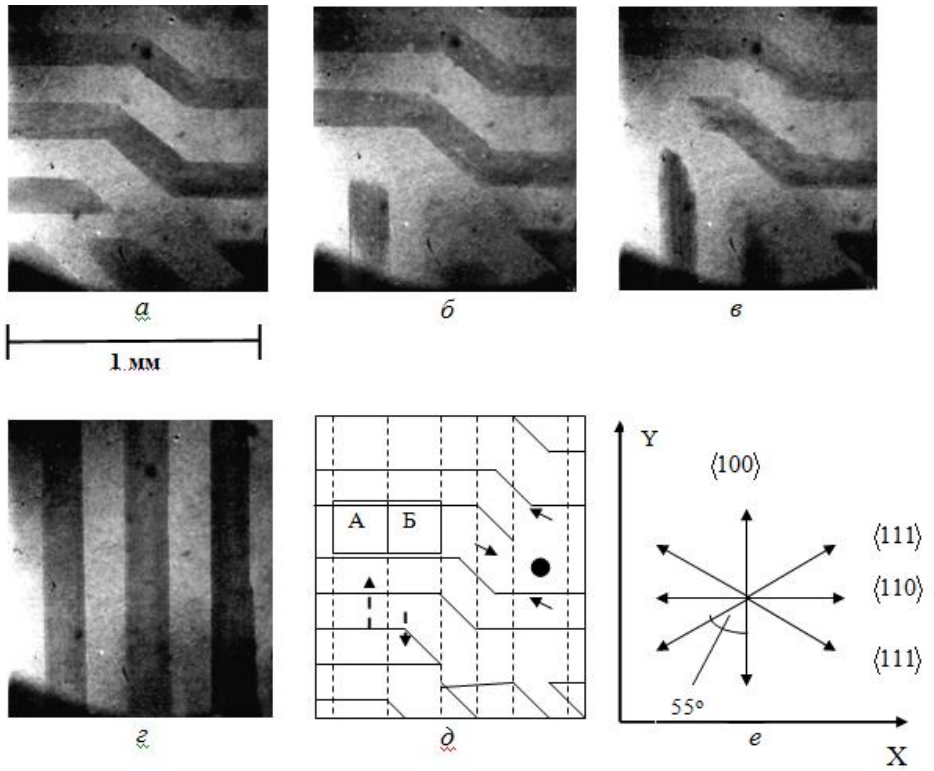
Барча экспериментлар 85 ÷ 295 К ҳароратлар соҳасида тадқиқот ўтказиш имкониятини берувчи ҳамда ҳароратнинг ўртача ўзгариш тезлиги 0,2 ÷ 0,3 К/с бўлган азот оптик криостатдан фойдаланилган ҳолда ўтказилди.

Диссертациянинг учинчи боби **«Нодир ер феррит гранатларининг спонтан ёки енгил магнитланувчанлик ўқи йўналишининг механик кучланишлар таъсирида қайта ориентацияланиш ҳолатларидаги домен структураси ва магнитооптик хоссалари»** деб номланиб $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ феррит гранатларининг домен структураси қайта шаклланишини тадқиқ этишга бағишланган.

Ўрганилган намуна ДС нинг ориентацион фазавий ўтиш $\Phi_{111} \rightarrow \Phi_{100}$ даги эволюциясининг асосий босқичлари 1- расмда акс эттирилган. Намунанинг ҳарорати хона хароратидан $T \approx 116$ К ҳароратгача камайтирилганда унинг ДС амалда ўзгаришсиз қолди (1*а* -расм). ДС нинг жиддий қайта шаклланиши $105 < T < 115$ К ҳароратлар соҳасида кузатилади (1 б,в,г - расм). Кўриниб турибдики ҳарорат 115 К дан 105 К га қадар камайганда қўшни доменлар тасвирларининг контрастлиги камайиб, ҳатто намунанинг айрим қисмларида уларнинг тасвирлари бутунлай йўқолди; эски доменларнинг ўрнида эса <100> йўналишга параллел домен чегарали (ДЧ) янги доменлар пайдо бўлди (янги доменларнинг тасвири визуал равишда «тумандан» пайдо бўлганга ўхшайди). Ҳарорат туширилган сари янги доменларнинг сони ортиб борди, янги доменларнинг кенглиги эса деярли ўзгармади, уларнинг узунлиги эса ортиб борди. Натижада $T \approx 105$ К бўлганида янги доменлар намунанинг бутун кузатиладиган юзаси бўйлаб ҳосил бўлди. 105 К дан паст ҳароратларда домен структураларининг тасвири аниқлиги қайта тикланди, уларнинг кўриниши эса экспериментдаги эришиш мумкин бўлган $T = 85$ К минимал ҳароратга қадар ўзгаришсиз қолди. Ҳарорат $T = 85$ К дан қайта оширилганда эса намунанинг домен структура эволюцияси тескари тартибда содир бўлди.

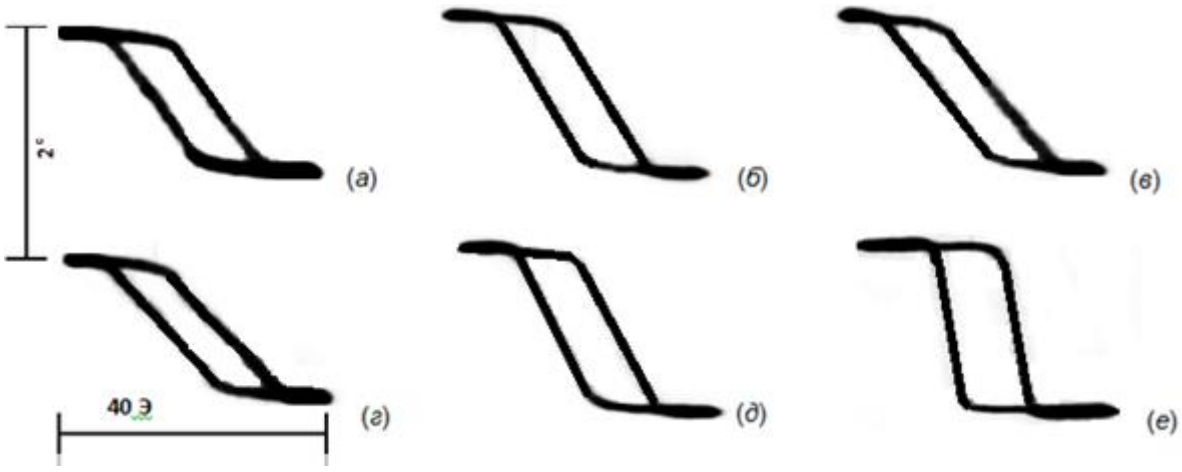
Шунингдек бу бобда феррит домен структураси қайта шаклланиши-нинг уни магнитооптик қабул қилувчанлиги ва коэрцитив кучга кўрсатадиган таъсири ҳам ўрганилди. 2-расмда намунада тадқиқ этилган Фарадей эффектининг магнит майдони $\mathbf{H} \parallel \langle 111 \rangle$ ҳолдаги частотаси 25 Гц қайта магнитловчи майдонда унинг домен структураси қайта шаклланадиган ҳароратлар соҳасидаги боғланишлар кўрсатилган.

2-расмдан кўриниб турибдики ориентацион фазавий ўтиш ҳарорати яқинида гистерезис эгри чизиғи тораяди (H_c коэрцитив куч камаяди), тўйинишдан узоқ соҳада эса $\Phi_F(H)$ чизиқли боғланишга яқинлашади.



а – Т = 116, *б* – 114, *в* – 112, *г* – 104 К ҳароратларда, *д* – намунанинг турғун домен конфигурацияларининг схематик тасвири: $Ф_{111}$ домен фазасидаги спонтан магнит моменти йўналишлари ва мос домен чегаралари узлуксиз чизиқлар ва стрелкалар билан тасвирланган, $Ф_{100}$ фазага мос келувчи конфигурациялар эса пунктир чизиқ ва пунктир стрелка билан кўрсатилган; А ва Б намунадаги енгил магнитланувчанлик ўқи қайта ориентацияланганда локал спонтан магнит моментлари қарама-қарши йўналишда буриладиган соҳалар. *е* – намуна текислигидаги асосий кристаллографик ва лаборатория координаталари системаси ўқларининг жойлашуви (XY текислик – микроскопнинг фокал текислиги).

1-расм. Намуна домен структурасининг тасвири



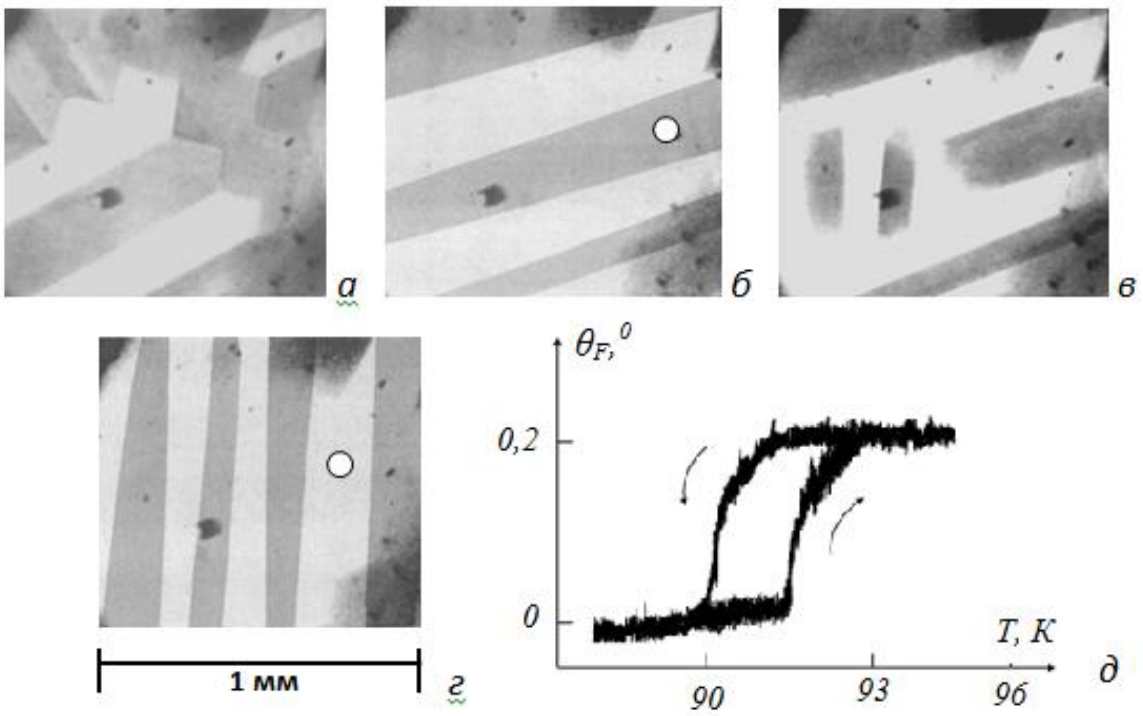
Т = 150 К (а), 130 (б), 112 (*в*), 110 (*г*), 100 (*д*) ва 85 К (*е*) ҳароратларда олинган

2-расм. Тадқиқ этилган намунада Фарадей эффекти магнит гистерезиси эгри чизиғининг осцилограммалари

Маълумки спонтан магнит моменти $\mathbf{M}_s$ нинг айланиш жараёнида магнитланувчанлик эгри чизиғи гистерезиссиз амалга ошади. Шунинг учун спин қайта ориентацияланиш нуқтаси яқинида тадқиқ этилган намунанинг магнит хоссалари асосан спонтан магнит моментининг магнитланиш йўналишида айланиши билан содир бўлади.

$Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ ДС нинг енгил магнитланиш ўқи йўналиши спонтан қайта ориентацияланиши ҳароратлари соҳасида қайта шаклланишини тавсифловчи ва олинган экспериментал натижаларни сифат даражасида тавсифлашга имкон берувчи модель таклиф қилинди. Бу модель енгил магнитланиш ўқининг қайта ориентацияланиш жараёнида янги магнит фазаси доменларининг пайдо бўлишида флуктуацион механизм асосий роль ўйнашини тушунтириб бера олади.

Шунингдек бу бобда $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ феррит гранатининг унда икки ўқли планар механик кучланишлар таъсирида ҳосил қилинган ориентацион фазавий ўтишдаги домен структурасининг эволюцияси ва спонтан фарадей эффектининг ҳароратга боғлиқлигини кўрсатувчи эксперимент натижалари ҳам келтирилган. Кристалда берилган симметрияга мос механик кучланиш ҳосил қилиш учун ўрганилаётган намуна мис шайбага маълум тарзда елимланган ва ҳарорат суюқ азот ҳароратигача камайтирилганда шайба радиусининг кичрайиши шунингдек мис ва феррит гранатнинг иссиқликдан кенгайиш коэффициентлари фарқи туфайли кристалл панжарада механик кучланишлар ҳосил бўлади.



а – Т = 85 К (кучланишсиз намуна), *б* – 100, *в* – 93, *г* – 90 К, *д* – спонтан Фарадей эффектининг ҳароратга боғлиқлиги

3-расм. Тадқиқ этилган намуна домен структурасининг тасвирлари

3 *а-г* – расмлардан кўриниб турибдики елимланган намунада 93 К дан кичик ҳароратларда домен структуралари тасвирларининг контрастлиги камаяди ва бунда эски доменлар ўрнига ⟨100⟩ йўналиш бўйлаб жойлашган янги тўғри бурчакли доменлар ҳосил бўлади. Ҳарорат 90 К га етгач янги доменлар намунанинг бутун юзаси бўйлаб «ўсиб чиқади» ва ҳарорат экспериментда эришиш мумкин бўлган 85 К бўлгунга қадар уларнинг кўриниши ўзгармайди.

3 *д* – расмдан кўриниб турибдики «елимланган» намунанинг ҳарорати T = 90 К дан кичик бўлганда спонтан Фарадей эффекти нолга айланади, демак T< 90 К бўлганда локал спонтан магнит моменти векторининг ёруғлик тарқалиш йўналишидаги проекцияси мавжуд бўлмайди. T = 90 К «елимланган» намуна ДС қайта шаклланадиган ҳароратга яқиндир. Ёруғлик доменларнинг марказида жойлашган нуқтага фокусланганлигини инобатга олиб T< 90 К да «елимланган» намуна спонтан магнит моменти вектори (110) текисликдан чиқмаслиги ва ⟨100⟩ йўналишда (Y ўқи бўйича) жойлашиши ҳақидаги хулосага келиш мумкин.

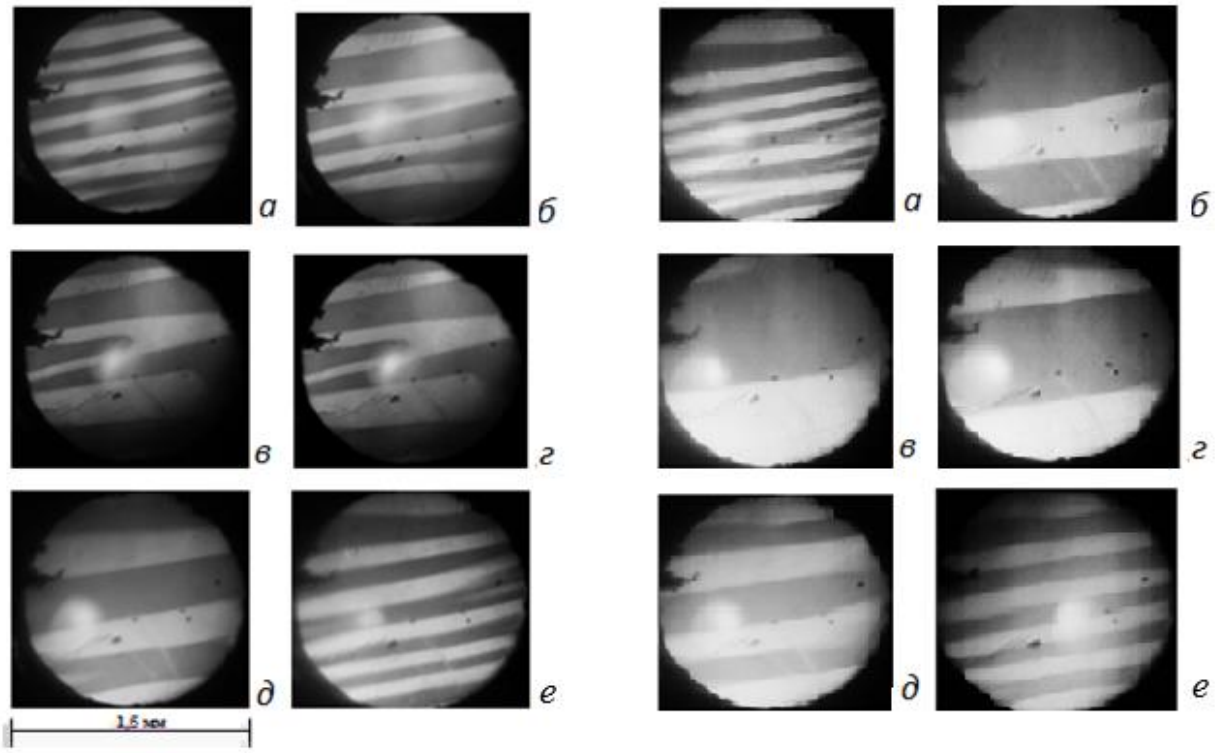
Тадқиқ этилган ориентацион фазавий ўтишни икки ўқ йўналиши бўйлаб кучланишга дучор бўлган кубик кристаллга мос келувчи термодина-мик потенциал асосида тавсифловчи феноменологик назария ишлаб чиқилди. Бу назарияга кўра кристалдаги икки ўқли кучланишлар таъсирида юзага келган анизотропияларни тавсифловчи K_{100} ва K_{110} доимийлар нисбатига ҳамда кубик анизотропияни тавсифловчи K_1 доимийга боғлиқ ҳолда кубик кристаллдаги спонтан магнит моменти йўналишининг қайта ориентацияла-шуви механик кучланишлар таъсирида 1- ёки 2- тур фазавий ўтишлар кўринишида содир бўлади. Бунда 1- ҳолда енгил магнитланувчанлик ўқининг қайта ориентациялашуви сакраб ўзгаради, 2-ҳолда эса унинг йўналиши бир кристалографик ўқдан бошқасига узлуксиз тарзда ўзгаради.

Бу назарияга кўра, бошланғич магнит фазасининг $\mathbf{M}_s \| \langle 111 \rangle$ дан $\mathbf{M}_s \| \langle 100 \rangle$ фазага ўтиши ($K_{100} - K_{110}$) = $|K_1|$ бўлганда сакраш билан содир бўлади (I – тур ўтиш), $\mathbf{M}_s \| \langle 110 \rangle$ фазага ўтиши эса ($K_{110} - K_{100}$) = $|K_1|/2$ – бўлганда узлуксиз рўй беради (II – тур ўтиш). Демак, K_{100} ва K_{110} анизотропия доимийларига боғлиқ ҳолда «елимланган» намунанинг домен структурасининг қайта шаклланиш манзараси принципиал фарқ қилиши лозим: биринчи ҳолда ҳарорат пасайганда $\mathbf{M}_s \| \langle 100 \rangle$ доменлар сакраб пайдо бўлади – бу кузатилган эксперимент натижаларига мос келади; иккинчи ҳолда эса $\mathbf{M}_s$нинг қайта ориентациялашуви доменларда узлуксиз содир бўлади.

Диссертациянинг тўртинчи боби **«Тербий феррит гранатининг магнит компенсация нуқтаси яқинидаги домен структураси, домен чегараларининг динамикаси ва магнитооптик хоссалари»** деб номланиб унда $Tb_3Fe_5O_{12}$ феррит гранатининг магнит компенсация нуқтаси атрофидаги ҳароратлар соҳасидаги домен структурасининг ўзгаришини тавсифловчи экспериментал натижалар баён қилинган. Бу тадқиқотлар асосида тербий феррит гранатининг бир доменли ва кўп доменли ҳолатларини ажратувчи магнит фазавий Н – Т – диаграммаси аниқланган.

Мисол учун 4-расмда намуна домен тузилишининг ҳароратга боғлиқлигини характерловчи бир қатор умумий тасвирлар келтирилган, бунда намуна Т = 85 К дан қизитила бошланган бўлиб қизиш тезлиги ~ 0,2 К/с ни ташкил қилган. 2-серияда келтирилган тасвирлар берилган Т ҳароратда намуна максимал қиймат Н = 60 Э дан нолгача тушувчи амплитудали 50 Гц частота билан ўзгарувчи ишораси ўзгарувчи магнит майдонда магнитсизлаштирилганда олинган манзарани акс эттиради.

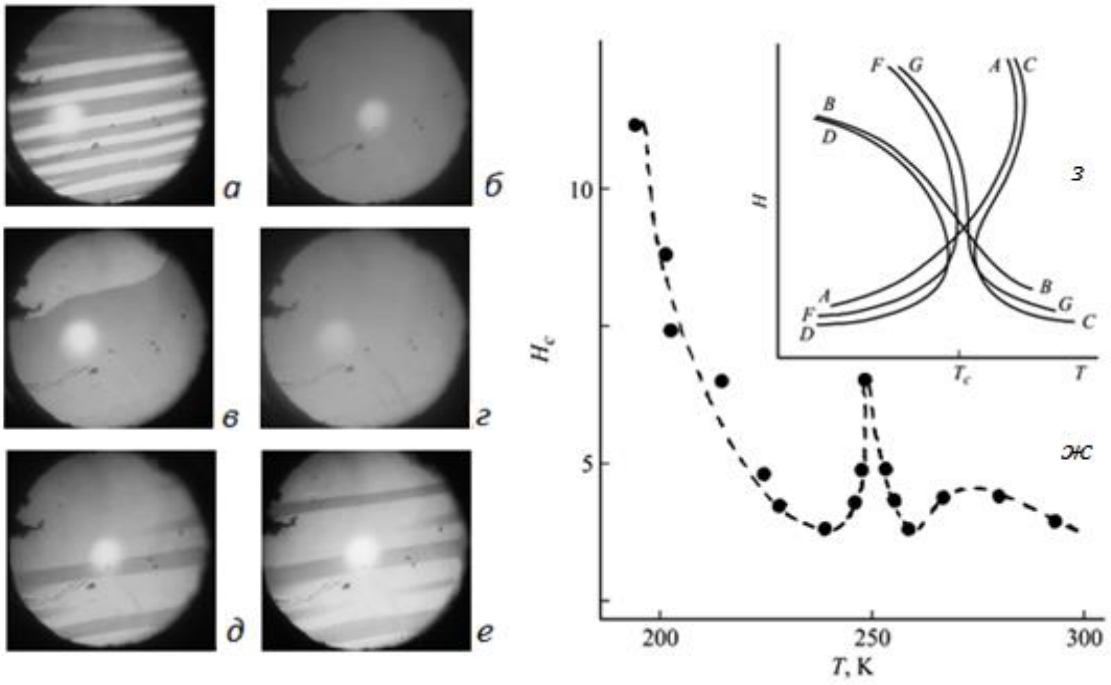
Намунада доменсиз ҳолатнинг пайдо бўлишини домен чегаралари йўналишида етарлича катта проекцияга эга магнит майдони таъсирида кузатиш мумкин. 5 *а-е* - расмдан кўриниб турибдики намунанинг доменсиз ҳолати T_c магнит компенсация ҳароратидан чап ва ўнгдаги бирор ҳарорат соҳасида кузатилади. 5 *ж* - расмда экспериментал йўл билан олинган магнит фазавий Н – Т – диаграмма келтирилган, унда кўриниб турибдики $T \rightarrow T_c$ га интилганда НЕФГ ва темир панжарасидаги магнит моментлари бир хил қийматга эга бўлади. Шунингдек бу ердан қуйидаги муҳим маълумотларни олиш мумкин 5 *з* - расм: АА и ВВ – ($\varphi = 0$) ва ($\varphi = \pi$) фазалар турғунлигининг йўқолиш чизиғи, СС ва FF – ($0 < \varphi < \pi/2$, $\xi = \pi/2$, $7\pi/6$, $11\pi/6$) ҳолатларнинг турғунлик соҳалари, DD ва GG – ($\pi/2 < \varphi < \pi$, $\xi = \pi/6$, $5\pi/6$, $3\pi/2$) ҳолатларнинг турғунлик чегаралари. Бу ерда φ ва ξ - $\mathbf{M}_{Fe}$ темир панжара магнит моментининг $\{[1\bar{1}0], [11\bar{2}], [111]\}$ Декарт координата системасидаги ([111] ўқ – қутбий ўқ) қутбий ва азимут бурчакларини билдиради.



1-серия 2-серия

Т = 205 К (*а*), 236 (*б*), 248 (*в*), 251 (*г*), 256 (*д*) ва 295 К (*е*) ҳароратларда олинган. 2-серияда, намуна ҳар бир ҳароратда амплитудаси нолга интилувчи ишораси ўзгарувчи магнит майдонда магнитсизлантиришга олиб келинган

4 – расм. Намуна домен структурасининг тасвирлари



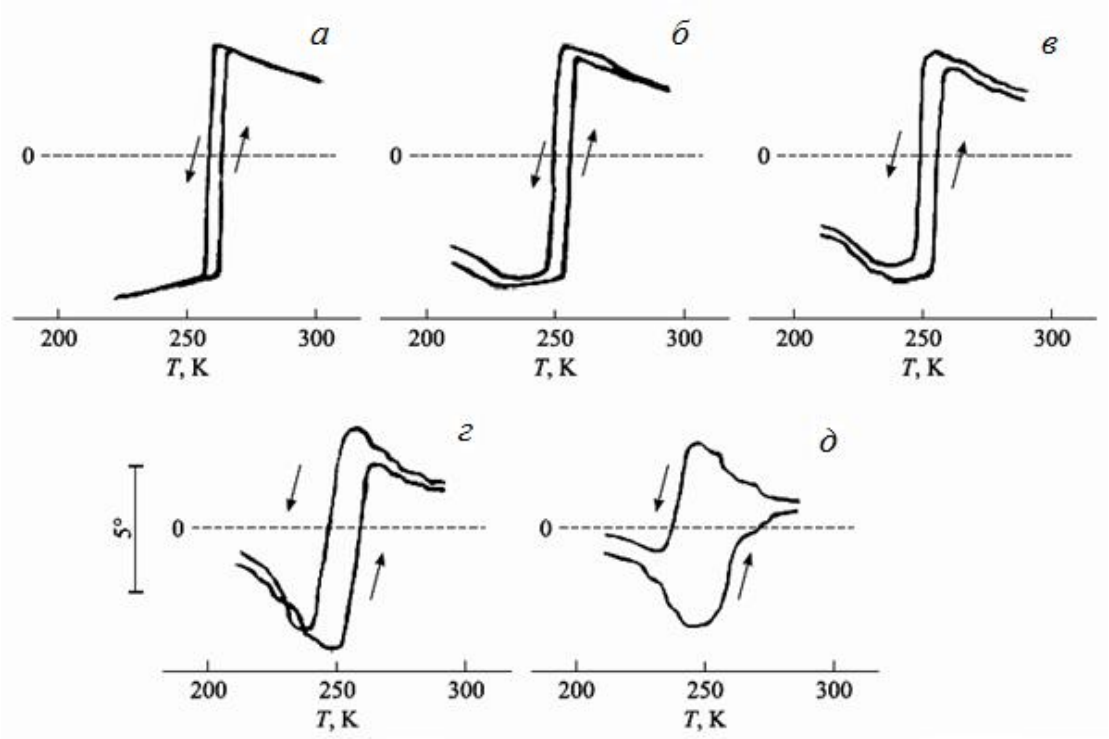
а - Т = 200 К, *б* - 240, *в* - 246, *г* - 260, *д* – 270, *е* - 295 К ҳароратларда олинган, бунда намуна ҳар бир ҳароратда амплитудаси нолга интилувчи ишораси ўзгарувчи магнит майдонда магнитсизлантиришга олиб келинган. *ж* – доменсиз ҳолатга ўтувчи намуна магнит майдон кучланганлигининг ҳароратга боғлиқлиги, *з* - **H** ||| [111] даги НЕФГ магнит ҳолатини тавсифловчи *H – T* – фазавий диаграмма

5 – расм. Намуна домен структурасининг тасвирлари ва магнит майдон кучланганлигини ҳароратга боғлиқлиги

Демак айрим мавжуд назариялар натижаларидан фарқли равишда магнит компенсация нуқтасидан ўтганда феррит – гранатдаги ДС **H** = 0 да сақланиб қолади. Шунингдек гранатда T_c атрофида ДС нинг мавжудлиги кристаллнинг колленіар бўлмаган магнит фазасига ўтишини билдиради ва бунда НЕФГ ва темирнинг магнит момент векторлари 180^0 дан фарқ қилувчи бурчак ҳосил қилади.

6-расмда домен чегаралари ўртача йўналишида ориентирланган магнит майдонининг турли қийматларида олинган Фарадей эффектининг ҳароратга боғлиқлик графиклари келтирилган. Кўриниб турибдики, олинган $Ф_F(T)$ эгри чизиқлар, намунани қизитиш ва совутишдаги компенсация нуқтаси орқали ўтувчи ҳароратларда айниқса яққол кўринади.

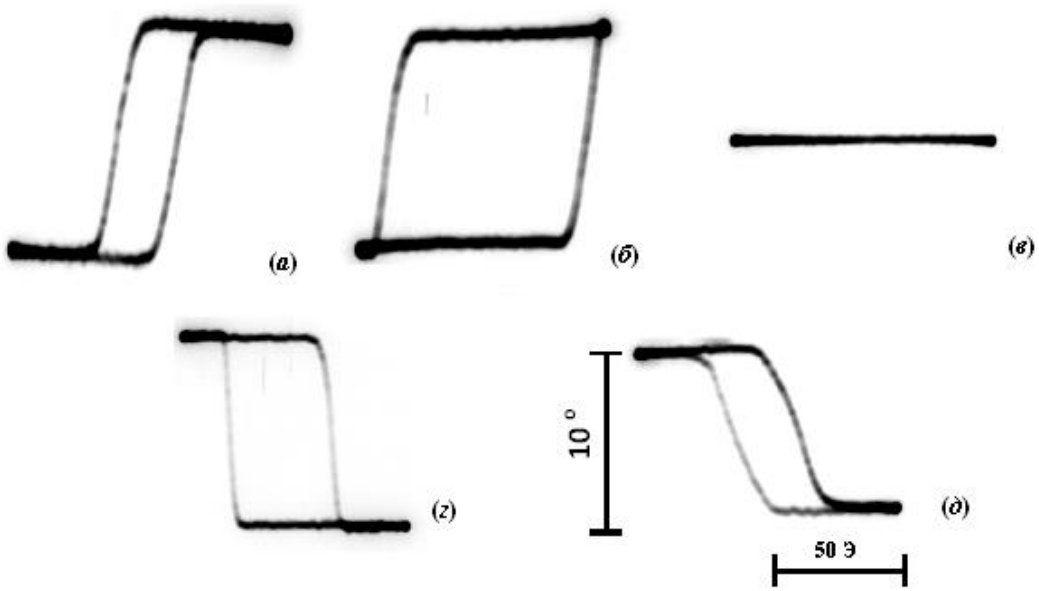
Таъкидлаш керакки, 6-расмда келтирилган Фарадей эффектининг ҳароратга боғлиқлигига яқин ҳолат, кучсиз магнит майдонларда $Dy_3Fe_5O_{12}$ феррит-гранати T_c магнит компенсация ҳарорати яқинида ҳам кузатилди, лекин диссертация ишини бошлаш вақтида ҳароратни ва магнит майдонни ўзгариши натижасида кузатилган $Ф_F(T)$ эгри чизиқлар шаклининг ўзгаришини қониқарли тушунтириш мавжуд эмасди.



Ташқи магнит майдонининг *а* - Н = 35 Э, *б* - 15, *в* - 10, *г* – 3 ва *д* - 2 Э қийматларида

6 – расм. Ўрганилган намунадаги Фарадей эффектининг ҳароратга боғлиқлиги

Турли ҳароратларда **H** вектор домен чегараларининг ўртача йўналиши бўйича ориентирланган намунани қизитиш вақтида олинган Фарадей эффекти магнит гистерезис илмоғининг бир қатор осциллограммлари 7-расмда келтирилган, улардан кўринадики, $T \rightarrow T_c$ да гистерезис илмоғи



а - 200, *б* - 241, *в* - 249, *г* – 268 ва *д* - 280 К ҳароратда олинган

7- расм. Ўрганилган намунадаги Фарадей эффекти магнит гистерезис илмоғининг осциллограммалари

кенглиги ўсади, лекин бевосита T_c яқинида гистерезис илмоғи амалда сакраб ёпилади ва горизонтал тўғри чизиққа айланади. Бундай гистерезис илмоғи намунани совутишда 245 ÷ 247 К, қизитишда эса 248 ÷ 250 К ҳароратлар оралиғида кузатилади. Шундай қилиб, ушбу ҳарорат оралиқларини эътиборга олмасдан, экспериментда амплитудаси Н = 60 Э бўлган ўзгарувчи магнит майдони бизни қизиқтирувчи ҳароратлар соҳасида намунани тўлиқ магнитсизлантириш шароитини яратади. Ушбу олинган гистерезис илмоғлари T_c яқинида намуна коэрцитив кучининг ҳароратга боғлиқлигини аниқлаш имкониятини берди.

НЕФГ даги ДЧ ҳаракатчанлигининг тугалланган микроскопик назарияси ҳозирга қадар мавжуд бўлмаганлиги учун $Tb_3Fe_5O_{12}$ феррит – гранатининг T_c яқинидаги техник магнитланувчанлик жараёнини тадқиқ этишда олинган натижаларни таҳлил қилиш учун 180^0 – ли ДС термодинамик назариясидан келиб чиқамиз.

Маълумки, идеал кристаллдаги домен чегараларининг вазияти ташқи магнит майдонида унинг зееман ва магнитостатик энергиялари мувозанати билан аниқланиб тадқиқ қилинувчи намунанинг геометрик ўлчамларига боғлиқдир. Бу ҳолда магнит чегараларининг мувозанат вазиятидан ўртача силжиши $\boldsymbol{H}$ енгил магнитланиш ўқи (Е.М.Ў) бўйлаб йўналганда қуйидаги шартдан аниқланади

$$2M_s H = kx, \tag{1}$$

Бунда k – қайтарувчи куч доимийси (қайишқоқлик коэффициенти), x - домен чегарасининг магнит майдон таъсиридаги мувозанат вазиятига нисбатан силжиш катталиги. Бу ҳолда Фарадей бурилиш бурчаги

$$\Phi_F = \theta_F \left(S_+ - S_-\right)/S = A\theta_F x, \tag{2}$$

бунда S – намунанинг ёритилган юзаси, S_+ ва S_- – $\mathbf{M}_s$ вектор қарама-қарши йўналган доменлар юзаси, A – пропорционаллик коэффициенти, θ_F – спонтан Фарадей эффектини тавсифловчи бурчак бўлиб, қуйидагича аниқланади

$$\theta_F = \left(a\vec{M}_{Fe}\cos\theta_1 + bM_R\cos\theta_2\right)l, \tag{3}$$

бунда a и b – ёруғлик частотасига боғлиқ бўлган магнитооптик коэффициентлар, θ_1, θ_2 – $\mathbf{M}_{Fe}$ ва $\mathbf{M}_R$ векторларининг намуна текислигига ўтказилган перпендикуляр билан ҳосил қилган бурчаклари (коллениар магнит фазасида $\theta_1 = \theta_2$); l – намуна қалинлиги.

Аммо етарлича катта ўлчамларга эга бўлган реал намуналарда домен чегараси вазиятини аниқловчи асосий сабаб, унинг кристал панжарасидаги пиннинг марказларининг фазовий тақсимотидир, ушбуни инобатга олган ҳолда (1) га кўра техник магнитланишнинг тўйиниш майдони катталигини қуйидагича ёзиш мумкин.

$$H_н = H_p + kw/4M_s, \tag{4}$$

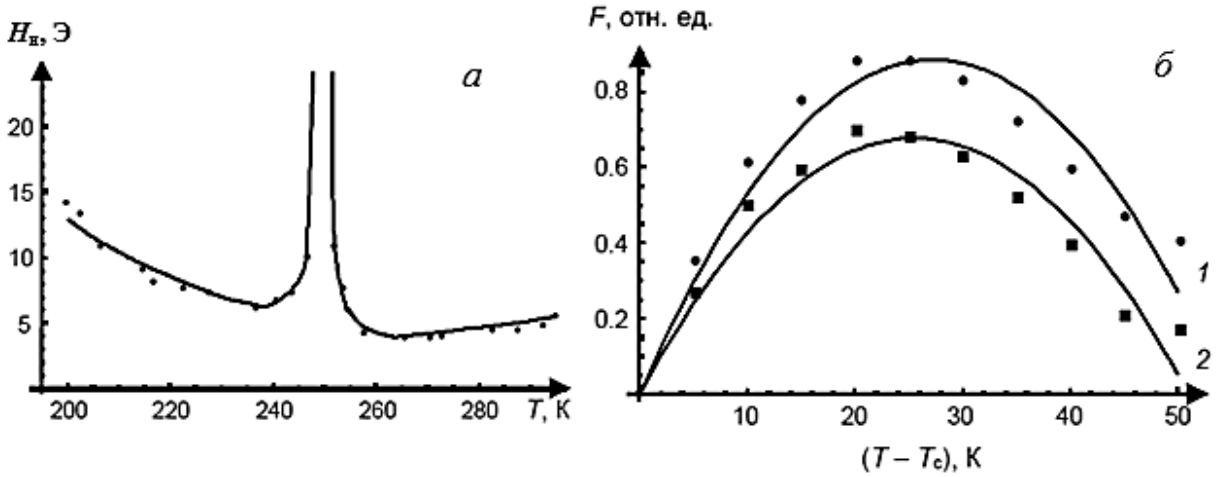
бунда w – домен кенглиги, ($x = w/2$ – силжишнинг мумкин бўлган максимал қиймати), (2) тенгламани эса қуйидаги кўринишда қайта ёзиш мумкин

$$F = \Phi_F/\theta_F = 2AM_s\left(H - H_p\right)/k, \tag{5}$$

$\theta_F \propto M_s$ бўлганлиги учун $F(T)$ ва $F(H)$ боғланишлар кристалл магнитланувчанлигининг ҳароратга ҳамда майдонга боғлиқлигини акс эттиради деб ҳисоблаш мумкин.

Агар домен чегараларидаги пиннинг марказларини кристалларда мавжуд магнит бўлмаган аралашмаларнинг микроскопик тўпламидан иборат деб фараз қилсак $H_p = \vartheta M_s$, бунда ϑ – дефектлар сони, шакли ҳамда ўлчамларига боғлиқ коэффициентни билдиради. Бу ҳолда $Tb_3Fe_5O_{12}$ феррит – гранатига мос келувчи $M_s(T)$ ҳароратга боғлиқлигидан фойдаланиб (4) ва (5) ёрдамида $H_н(T)$ ва $F(T)$ боғланишларни ҳисоблаш, ҳамда уларни мос эксперимент натижалари билан таққослаш мумкин.

Эксперимент натижаларига мос келтирилган $H_н(T)$ ва $F(T)$ функциялар 8 – расмда келтирилган.



а – намунанинг бир доменли ҳолатга ўтиши: узлуксиз чизиқ – (4) бўйича ҳисоблаш натижалари, нуқталар – эксперимент, *б* - турли *H* майдон кучланганликлари учун олинган эгри чизиқлар: 1 эгри чизиқ – 3 Э, 2 эгри чизиқ – 2 Э. Узлуксиз чизиқлар – (5) бўйича ҳисоблаш натижалари, нуқталар – эксперимент

8 - Расм. Ташқи магнит майдони ва Φ_F/θ_F нисбат катталигининг ҳароратга боғлиқлиги

8 *а* ва б – расмларда келтирилган графикларни таққослаш асосида (4) ва (5) формулалар намунани магнитлашдаги домен структура ўзгаришини визуал кузатиш ва Фарадей эффектини ҳароратга боғлиқлигини кузатишга асосланган икки мустақил эксперимент натижаларини етарлича яхши аниқлик билан тавсифлайди дейиш мумкин.

Шундай қилиб, реал шароитни соддалаштириш мақсадида қилинган қатор чекланишлар ва яқинлашувларга қарамасдан ушбу модел $Tb_3Fe_5O_{12}$ феррит – гранатининг магнит компенсация ҳарорати орқали ўтувчи ҳароратлар соҳасида унинг техник магнитланувчанлик жараёни қонуниятларини кристалл ДС нинг *H* ва *T* ўзгариши билан боғлиқ ўзгаришларини ҳеч бўлмаганда сифат даражасида тўғри тушунтириб бера олади.

Шунингдек $Tb_3Fe_5O_{12}$ нинг компенсация нуқтаси жойлашган $200 \le T \le 295$ К ҳароратлар соҳасида фарадей буралишининг ҳароратга боғлиқлиги экспериментал тадқиқ қилинди. 9-расмда 25 ва 75 Гц частота билан ўзгарувчи магнит майдонида намунани $T = 85$ К дан бошлаб қизитишда олинган

$|\Phi_F|$ бурчакнинг ҳароратга боғлиқлиги кўрсатилган. 9-расмга кўра $|\Phi_F|$ катталик $T \to T_c$ максимал қийматгача ошиб боради ва нолга яқин равишда кескин камаяди; айниқса $\Phi_F \approx 0$ қиймати ҳароратнинг етарлича кенг ($\approx$ 10 К) оралиғида кузатилади.

Магнит компенсация ҳароратига яқинлашганда домен чегаралари силжишлари катталигининг ҳароратга номонотон боғланишини талқин қилиш учун домен чегаралари ҳаракатининг феноменологик назариясини таклиф қилдик, унга биноан ҳаракат тенгламаси қуйидаги кўринишга эга

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt}\alpha + kx = 2M_sH_o\cos\omega t \qquad (6)$$

Бу ерда: x – домен чегарасининг силжиши, m – домен чегараси бирлик юзасининг массаси, α – қовушқоқ ишқаланиш параметри (сўниш коэффициенти), k – қайтарувчи куч доимийси (қайишқоқлик коэффициенти), H_0 – магнит майдонининг амплитудавий қиймати, ω – унинг доиравий частотаси, $\boldsymbol{M_s}$ – спонтан магнит моменти.

Барқарорлашган режимда домен чегараларининг мажбурий тебранишлар ифодаси, стандарт белгилашлар асосида қуйидаги кўринишни олади

$$x = X_o[(\omega_o^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2]^{-1/2}\cos(\omega t - \delta), \qquad (7)$$

бунда $\omega_0 = (k/m)^{1/2}$ – домен чегараларининг хусусий тебраниш частотаси, $2\beta = \alpha/m$, $X_0 = 2M_sH_0/m$, $\delta = arctg2\omega\beta/\omega_0^2 - \omega^2$ – тебранишларнинг бошланғич фазаси.

(7) – дан фойдаланиб (2) – ифодани компютерда ҳисоблаш учун қулай кўринишини ҳосил қиламиз

$$F(T) = \left[\frac{(\Phi_F/\theta_F)}{(\Phi_F/\theta_F)_{\max}}\right]^2 = \left(\frac{x}{x_{\max}}\right)^2 = \frac{M_s^2}{M_{Fe}^2}\left(A + B\frac{M_{Fe}^2}{M_s^2} + C\frac{M_{Fe}^4}{M_s^4}\right)^{-1}, \qquad (8)$$

бунда $(\Phi_F/\theta_F)_{\max}$ – $(\Phi_F/\theta_F)(T)$ функциянинг максимал қиймати $A = (k^2 + \alpha^2\omega^2)2\pi\alpha^2k\Delta\gamma_{Fe}^2$, $B = 2(\omega/2\pi\Delta\gamma_{Fe}^2)^2$, $C = \omega^4/8\pi^3\alpha^2k\Delta^3\gamma_{Fe}^6$.

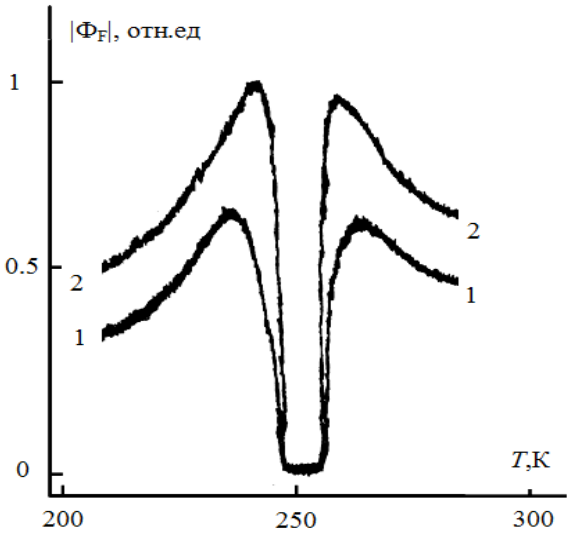
10 – расмда (8) – ифода бўйича ҳосил қилинган $[x(T)/x_{\max}]^2$ боғлиқлик 9-расмда келтирилган (ν = 75 Гц) $Tb_3Fe_5O_{12}$ Фарадей эффектининг ҳароратга боғлиқлиги асосида олинган $F(T)$ экспериментал боғлиқлик билан солиштирилган. 10 – расмда келтирилган графиклардан кўринадики, $[x(T)/x_{\max}]^2$ бўйича ҳисобланган боғлиқлик ҳарорат ўзгариши бўйича $|\Phi_F|$ бурчак ўзгаришини асосий белгиларини акс эттиради.

Резонанс шарти

$$\omega^2 = \frac{k}{m} - \frac{\alpha^2}{2m^2} = 2k\pi\Delta\left(\gamma_{Fe}\frac{M_s}{M_{Fe}}\right)^2 - 2(\alpha\pi\Delta)^2\left(\gamma_{Fe}^2\frac{M_s}{M_{Fe}}\right)^4 \qquad (9)$$

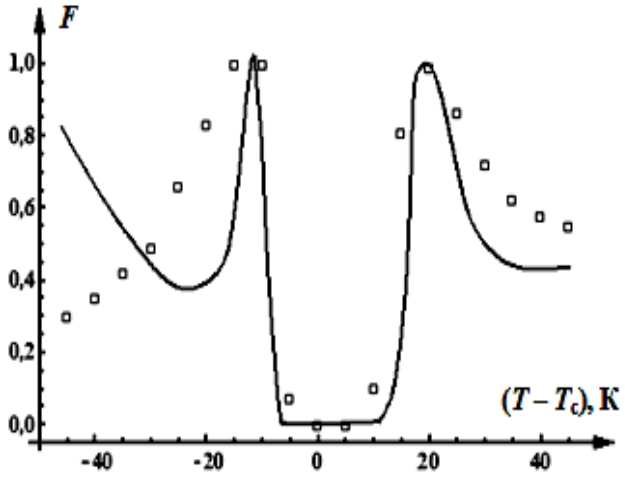
ни таҳлил қилиш ҳамда T_c яқинида $\mathbf{M_s}\to 0$ ва $m\to\infty$ бўлишини инобатга олиб, ҳарорат компенсация нуқтасига яқинлашганда майдоннинг резонанс частоталари қуйи частоталар соҳаси томон силжиши ҳақидаги хулосага келамиз. Бундан ташқари бу ердан ω ўсиши билан $x(T)/x_{max}$ эгри чизиқнинг

максимуми T_c ка нисбатан ўнг ва чапга силжиши ҳам келиб чиқади – улар экспериментал натижаларга мос келади (10-расмга қаранг). (x_{max} – домен силжишлари амплитудасининг максимал қиймати).



1 – ν = 75 Гц, H_o = 0,2 Э; 2 – ν = 25 Гц, H_o = 0,3 Э. Ҳароратнинг ўзгариш тезлиги – 0,2 К/с

9 - расм. Намунадаги Фарадей эффектининг ҳароратга боғлиқлиги



Нуқта – эксперимент, узлуксиз чизиқ – (8) функцияни экспериментал нуқталарга мослаштириш натижаси

10 – расм. *F* катталикни ҳароратга боғликлиги

Шунингдек, домен чегаралари ҳаракат тезликларининг ҳароратга боғлиқлигини тадқиқ этиш асосида ҳарорат магнит компенсация нуқтасига яқинлашганда домен чегаралари ҳаракат тезликларининг ўсиши, T_c яқинида эса бу тезлик нолга тенг бўладиган чекли ҳароратлар оралиғи мавжуд бўлиши лозимлиги ҳақидаги хулосага ҳам келамиз (демак, бу соҳада фарадей айланиш бурчаги ҳам нолга тенг бўлади).

Тажрибада кузатилган Фарадей эффекти гистерезис эгри чизиғининг ўзгариши $T \rightarrow T_c$ да домен чегараларининг ҳаракат тезликларининг юқоридаги хусусиятларини тасдиқлайди.

Шундай қилиб, таклиф этилган назария феррит-гранатлар магнито-оптик қабул қилувчанлигининг ҳарорат магнит компенсация нуқтаси орқали ўтгандаги ҳароратга боғлиқлигининг тажрибада кузатилган натижаларини (ҳеч бўлмаганда, сифат даражасида) тавсифлаш имконини беради.

ХУЛОСА

Олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим қилинган:

1. $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ феррит гранати ДС нинг эволюцияси енгил магнитланиш ўқи йўналишининг спонтан қайта ориентацияланиш жараёнида биринчи марта тўғридан – тўғри визуал кузатган. Тадқиқ қилинган ориентацион фазавий ўтиш маълум ҳарорат оралиғида «чўзилган» бўлиб

унда қуйи ҳароратли ва юқори ҳароратли магнит фазасига мос келувчи доменлар бир вақтнинг ўзида мавжуд бўлиб, кристалл домен конфигурациясининг қайта шаклланиши яққол ҳарорат гистерезиси кўринишида амалга ошган.

2. $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ феррит-гранатининг техник магнитланиш жараёни спин қайта ориентацияланиш ҳароратлари соҳасида асосан спонтан магнит моменти вектори $\mathbf{M}_s$ нинг магнитловчи магнит майдон кучланганлиги Н нинг йўналишига бурилиши билан аниқланган. Тадқиқ қилинган фазавий ўтиш ҳарорати яқинида кристаллнинг магнитооптик қабул қилувчанлиги тор кескин максимумга эга бўлан ва коэрцитив куч камаяган.

3. $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ феррит гранати домен структурасининг енгил магнитланиш ўқи спонтан қайта ориентациялашуви ҳароратлари соҳасида қайта шаклланишини тавсифловчи модель таклиф қилинган ва у барча олинган экспериментал натижаларни сифат даражасида тушунтириш имконини берган. Кристаллнинг спин қайта ориентациялашув соҳасида ДС нинг қайта шаклланиши, ҳарорат гистерезисида янги магнит фазаси доменларининг пайдо бўлишида флуктуацион механизм асосий рол ўйнаши кўрсатилган.

4. Кубик ферримагнетикда икки ўқли механик кучланишлар таъсирида ҳосил бўлувчи магнит ориентацион фазавий ўтиш биринчи марта экспериментал тадқиқ этилган. Бунинг учун нисбатан катта бўлмаган табиий кристаллографик анизотропия билан тавсифланувчи $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ феррит гранати танлаб олинган ва бу кристаллдаги спонтан магнит моменти ориентациясини ташқи механик кучланишлар ёрдамида ўзгартириш имкониятини берган. $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ феррит гранатида икки ўқли кучланишлар таъсирида ҳосил бўлувчи спонтан Фарадей эффекти катталигининг ўзгариши ва домен структураси эволюциясини ўрганиш асосида ушбу магнит ориентацион фазавий ўтиш I – тур фазавий ўтишга мос келиши ҳамда яққол гистерезис тарзида содир бўлиши кўрсатилган.

5. Кубик кристаллнинг икки ўқли кучланишларини тавсифловчи термодинамик потенциал асосида тадқиқ этилган ориентацион фазавий ўтишнинг феноменологик назарияси ишлаб чиқилган. Бу назарияга кўра кристаллнинг кубик анизотропия доимийси K_1 ҳамда кристаллда икки ўқли кучланишлар таъсирида ҳосил бўлувчи K_{100} ва K_{110} анизотропиялар доимийларининг нисбатига боғлиқ ҳолда кубик кристалл спонтан магнит моменти йўналишининг қайта ориентацияланиши I– тур (енгил магнитланиш ўқининг қайта шаклланиши бир зумда содир бўлади) ёки II– тур (енгил магнитланиш ўқи бир кристаллографик йўналишдан иккинчисига силлиқ тарзда ўзгаради) фазавий ўтиш кўринишида содир бўлиши аниқланган.

6. $Tb_3Fe_5O_{12}$ феррит-гранатининг домен структураси магнит компенсация ҳароратини ўз ичига олувчи ҳароратлар соҳасида экспериментал тадқиқ этилган, унга кўра айрим мавжуд назарияларга қарама – қарши ўлароқ $H = 0$ бўлган ҳолда магнит компенсация ҳарорати орқали ўтганда кристаллда домен структуранинг сақланиши кўрсатилган.

7. Нодир ер феррит – гранталарининг магнит компенсация ҳарорати яқинидаги магнит ҳолатини тавсифловчи магнит фазавий $H - T$ - диаграмма экспериментал равишда аниқланган бўлиб унга кўра кристаллнинг ҳарорати компенсация нуқтаси орқали ўтганда нодир ер магнит моменти $\mathbf{M}_R$ ва темир панжаранинг магнит моменти $\mathbf{M}_{Fe}$ ларнинг қатъий антипараллел жойлашувининг бузилилади, яъни $\mathbf{M}_{Fe}$ ва $\mathbf{M}_R$ векторларнинг кесишган бурчак ҳосил қилиши энергетик нуқтаи назардан афзал бўлади ва натижада $\mathbf{M}_{Fe} + \mathbf{M}_R$ натижавий магнитланувчанлик нолга айланмайди.

8. $Tb_3Fe_5O_{12}$ феррит гранатининг техник магнитланиш жараёнига магнит компенсация ҳарорати яқинидаги домен структура муҳим таъсир кўрсатиши аниқланган ва бизга мавжуд назариялар ушбу олинган экспериментал натижаларни тўлиқ тавсифлаш имкониятини бермаган.

9. Ферримагнит кристаллнинг магнит компенсация ҳароратини ўз ичига олувчи ҳароратлар соҳасида ҳамда домен чегараларининг кристалл панжарадаги дефектларда пиннингланишини инобатга олувчи техник магнитланиш жараёнини тавсифловчи назария таклиф қилинган. Ушбу назария $Tb_3Fe_5O_{12}$ феррит гранатининг магнит компенсация ҳарорати атрофида кузатилувчи техник магнитланиш жараёнининг асосий хусусиятларини ҳеч бўлмаганда сифат даражасида тушунтириб бера олаган.

10. Нодир ер феррит гранати домен чегараларининг динамикаси магнит компенсация ҳарорати атрофида қуйи частотали ишораси ўзгарувчан магнит майдони таъсирида биринчи марта тадқиқ этилган.

11. Ҳарорат магнит компенсация ҳароратига яқинлашганда домен чегаралари силжишларининг ҳароратга номонотон боғлиқ эканлиги аниқланган, бунда домен чегараларининг силжишлари магнит компенсация ҳароратидан чап ва ўнгда кескин локал максимумларга эга бўлиши кўрсатилган. Кузатилган натижалар магнит компенсация ҳарорати яқинида ўзгарувчан магнит майдони частотаси ҳамда домен чегараларининг хусусий частоталари резонанси билан боғлиқ эканлиги тушунтирилиб берилган.

12. Домен чегараларининг ишораси ўзгарувчан магнит майдондаги қуйи частотали резонансини тавсифловчи феноменологик назария ишлаб чиқилган. Унга кўра кристалл магнит компенсация ҳароратига яқин ҳароратга эга бўлганда доменларнинг массаси ортиши, хусусий тебраниш частоталари эса камаиши кузатилган. Таклиф этилган назария $Tb_3Fe_5O_{12}$ феррит – гранатлари домен чегараларининг динамикасини, унинг бошланғич магнитооптик қабул қилувчанлигини ва Фарадей эффекти магнит гистерезиси эгри чизиғининг шаклини тушунтириб бера олган.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

БУХАРСКИЙ ИНЖЕНЕРНО – ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ШАРИПОВ МИРЗО ЗОКИРОВИЧ

ДОМЕННАЯ СТРУКТУРА И МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ФЕРРИТОВ – ГРАНАТОВ В ОБЛАСТИ СПИН – ПЕРЕОРИЕНТАЦИОННЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

01.04.09 – Физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА (DSc) ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

ТАШКЕНТ – 2018

Тема диссертации доктора наук (DSc) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан B2018.2.Ds/FM68.

Докторская диссертация выполнена в Бухарском инженерно – технологическом институте.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.iplt.uz) и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyonet.uz).

Научный консультант:	**Джураев Даврон Рахманович** доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	**Мукимов Комил Мукимович** доктор физико-математических наук, академик
	Азаматов Закиржан Тахирович доктор физико-математических наук, профессор
	Ибрагимова Элвира Меметовна доктор физико-математических наук, профессор
Ведущая организация:	**Самаркадский государственный университет**

Защита состоится «____»_____ 2018 г. в _____ часов на заседании Научного совета DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий по адресу: 100084, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел./Факс: (+998-71) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz.

Докторская диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Института ионно-плазменных и лазерных технологий за № ____, с которой можно ознакомиться по адресу: 100125, г. Ташкент, ул. Дўрмон йули, дом 33. Тел./Факс: (+998-71) 262-32-54.

Автореферат диссертации разослан «___»_____ 2018 года

(протокол рассылки __ «___»_____ 2018 года).

Х.Б. Ашуров
Председатель научного совета по присуждению ученых степеней, д.т.н., старший научный сотрудник

Д.Т. Усманов
Ученый секретарь научного совета по присуждению ученых степеней, к.ф.-м.н.

С.А. Бахрамов
Председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор, академик

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (DSc) диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мировом масштабе главная проблема спиновой электроники – преобразование информации в форме намагниченности в электрическое напряжение. В настоящее время эта задача решается с использованием явления гигантского магнитного сопротивления. Магнитоэлектрический эффект представляет собой альтернативное решение данной проблемы, позволяющей составить конкуренцию существующим устройствам спиновой электроники, принцип работы которых основан на явлении гигантского магнитосопротивления. В перспективе использование магнитоэлектрических явлений может позволить отказаться от записи информации с помощью электрических токов, поскольку традиционно используемые элементы памяти сталкивается с проблемой чрезмерного тепловыделения из-за увеличения плотности тока.

На сегодняшний день в мире разработка новых приборов и устройств спиновой электроники на основе магнитоэлектрических эффектов сталкивается с принципиальной проблемой – количество известных на сегодняшний день материалов, обладающих достаточной величиной магнитоэлектрических эффектов, ограничено. В этой связи значительный интерес представляют редкоземельные ферриты-гранаты (РЗФГ), в которых недавно был обнаружен достаточно большой флексомагнитоэлектрический эффект (неоднородный магнитоэлектрический эффект) при комнатной температуре и показано, что положением доменных границ (ДГ) в эпитаксиальных пленках этих ферримагнетиков можно управлять неоднородным электрическим полем. С этой точки зрения исследования параметров и свойств доменной структуры (ДС) ферритов-гранатов являются приоритетными для области современного материаловедения, занимающейся поиском и созданием материалов для элементной базы приборов спиновой электроники нового поколения, принцип работы которых основан на изменении доменной конфигурации материала под действием электрического и магнитного поля.

В Республике Узбекистан ведутся весомые научно исследовательские работы по данной тематике, в частности, исследование перестройки доменной структуры РЗФГ в области магнитных ориентационных фазовых переходов – в области, где ДС материала становится неустойчивой, а подвижность ДГ существенно изменяется. Следовательно, вблизи фазовых переходов влияние внешних воздействий (электрического и магнитного поля, давления и т.д.) на ДС становится наиболее существенным, что позволяет управлять доменной конфигурацией материала относительно слабыми полями, получение которых не связано с техническими трудностями.

Данное диссертационное исследования в определенной степени служит решению задач, предусмотренных Указом Президента № УП-4947 «О стратегии действий по дальнейшему совершенствованию управления, ускоренному развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года и в Постановлениях Президента № ПП-2772 «О мерах по дальнейшему совершенствованию управления, ускоренному развитию и диверсификации

электротехнической промышленности на 2017-2021 гг.» от 13 февраля 2017 года и № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно – правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики. Исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан: ПФИ-2 – «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации[1]. В ведущих мировых научно-исследовательских центрах, в том числе, the center for materials Research and Analysis, University of Nebraska (США), the department of Materials Science and Engineering (Тель-Авив, Израиль), the institute de ci'encia de materials de Barcelona (Испания), в Московском Государственном университете, в институте общей физики им. А.Н. Прохорова (Россия), в Харьковском физико-техническом институте низких температур (Украина) и в Национальном университете Узбекистана проводятся исследования по различным аспектам магнитооптических свойств и спин-переориентационных фазовых переходов в магнетиках.

На мировом уровне по научному направлению диссертационной работы решены ряд актуальных проблем и получены важные научные результаты: разработан магнитоэлектрический способ управление ДГ ми в пленке феррита граната (Московский Государственный университет, Россия); определены основы связи магнитоэлектрических эффектов магнитоэлектроникой (University of Nebraska, США); спонтанные фазовые переходы в РЗФГ (Донецкий национальный университет, Украина); намагниченность и магнитоэлектрический эффект в мультиферроиках (Институт общей физики им. А.Н. Прохорова, Россия), некоторые свойства спин-переориентационных фазовых переходов в магнетиках (Башкирский государственный университет, Россия), моделирование фазовых переходов в магнитных системах (Институт физики им. Х.И.Амирханова Российской Академии наук), исследование сложных магнитнослойных структур (Челябинский государственный университет, Россия) и исследование ДС и магнитооптических свойств РЗФГ в области спин-переориентационных фазовых переходов (Национальный университет Узбекистана и Бухарский госуниверситет).

В настоящее время во многих странах мира в перспективных направлениях, в частности, в спиновой электронике, в магнитоэлектронике, в современном материаловедение, в нанотехнологии низкоразмерных систем проводятся научно – исследовательские работы по изучению ДС, магнитооптических свойств и спин – переориентационных фазовых переходов в магнетиках.

[1] Обзор международных научных исследований по теме диссертации проведен на основе: https://journals.aps.org, https://ufn.ru, https://www.elsevier.com, https://apps.webofknowledge.com, iopscience.iop.org, journals.ioffe.ru, Web of Science, Scopus, Springer. ResearchGete и из других литературных источников.

Степень изученности проблемы. В настоящее время ведущими учеными мира достаточно подробно исследована как экспериментально, так и теоретически ДС РЗФГ при комнатной температуре. Благодаря этим исследованиям РЗФГ (в основном их эпитаксиальные пленки) широко используются в элементной базе различных приборов и устройств волоконной и интегральной оптики (В.В. Рандошкин и А.Я. Червоненкис), а так же являются основным материалом элементов магнитной микроэлектроники (А. Бобек, Е. Дела-Торре), функционирующих на основе перемещения цилиндрических магнитных доменов. В РЗФГ в силу их кубической симметрии имеется несколько направлений, вдоль которых может ориентироваться вектор спонтанной намагниченности в доменах. Эта магнитная многоосность РЗФГ приводит к разнообразию вида реализующихся в них доменных конфигураций, существенно зависящих от кристаллографической ориентации исследуемых образцов.

Новый импульс исследования ДС РЗФГ получили после того, как русскими учеными А.С. Логгиновым, Г.А. Мешковым, А.В. Николаевым и А.П. Пятаковым было обнаружено, что положением ДГ в эпитаксиальных пленках этих ферримагнетиков можно управлять неоднородным электрическим полем (флексомагнитоэлектрический эффект), что открывает перспективу использования обнаруженного эффекта при разработке принципиально новых приборов спиновой электроники, которые изучены А.К. Звездином и А.П. Пятаковым из Московского государственного университета.

При этом В.В.Волковым и В.А.Боковым выяснилось, что многие аспекты поведения ДГ (стенок) в РЗФГ до настоящего времени остаются малоизученными. Так, например, такая практически важная характеристика ДГ, как их подвижность, определяющая быстродействие большинства приборов магнитной микроэлектроники, в РЗФГ оказывается в десятки раз меньше величины подвижности, вытекающей из существующих теорий динамики ДГ.

Не ясной остается и ситуация с поведением ДГ в РЗФГ вблизи температуры их магнитной компенсации T_c: прямых экспериментальных исследований эволюции ДС РЗФГ при переходе температуры через точку компенсации практически не проводилось, а существующие теории не дают однозначного предсказания изменения ДС при $T \to T_c$. Так, согласно результату украинских ученых В.Г. Барьяхтара, А.Н. Богданова и Д.А.Яблонского из-за того, что при $T \to T_c$ магнитостатическая энергия кристалла стремиться к нулю, ДС становится энергетически не выгодной, и, как следствие - в некотором температурном интервале в окрестности T_c границы между доменами исчезают, и кристалл переходит в однородное (монодоменное) магнитное состояние.

В то же время из магнитной фазовой $H - T$ – диаграммы, описывающей магнитное состояние РЗФГ изученные К.П Беловым, А.К. Звездином, А.М. Кадомцевой и Р.З. Литвиновым вытекает, что вблизи точки компенсации с энергетической точки зрения может стать выгодным состояние со скошенными друг относительно друга магнитными моментами железной и

редкоземельной подрешеток, в результате – при $T \to T_c$ доменная структура и следовательно, доменные границы в кристалле должны существовать.

Учеными из Узбекистана, в частности академиком К.М. Мукимовым, проф. У.В. Валиевым, проф. Д.Р. Джураевым и д.ф.-м.н. Б.Ю.Соколовым ведутся экспериментальные и теоретические исследования ДС и магнито-оптических свойств РЗФГ и различных магнитных кристаллов. Эти, а также ряд не решенных на сегодняшний день задач, касающихся поведения доменной структуры РЗФГ при магнитных ориентационных фазовых переходах, послужили стимулом для проведения исследований, результаты которых составили основу данной диссертационной работы.

Связь темы диссертации с научно – исследовательскими работами высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Настоящая диссертационная работа выполнена в Бухарском инженерно-технологическом институте в рамках фундаментальных научных проектов молодых ученых ЁФ2-ОТ-0-19724, ЁФ2-4 «Фотомагнитные явления в слабых ферромагнетиках» (2014-2015), ЁФ2-1 «Исследование магнитооптических свойств и фазовых переходов в ферритах гранатах с учётом ориентационных взаимодействий» (2016-2017).

Целью исследования является установление закономерностей поведения доменной структуры редкоземельных ферритов-гранатов при магнитных ориентационных фазовых переходах, а также взаимосвязи между этими изменениями доменной структуры и изменением таких практически важных магнитных характеристик материала как подвижности доменных границ, магнитная восприимчивость, коэрцитивная сила.

Задачи исследования:

выполнить прямые визуальные наблюдения эволюции доменной структуры феррита-граната $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ при спонтанной переориентации направления оси легкого намагничивания;

провести исследования температурной зависимости магнитного гистерезиса эффекта Фарадея и начальной магнитооптической восприимчивости феррита-граната $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$;

предложить модель перестройки доменной структуры феррита-граната $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ в температурной области спонтанной спиновой переориентации;

провести экспериментальные исследования температурной зависимости спонтанного эффекта Фарадея и перестройки доменной структуры феррита-граната $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ при ориентационном фазовом переходе, индуцированном в нем планарными двуосными механическими напряжениями;

на основе термодинамического потенциала двуоснонапряженного кубического кристалла развить феноменологическую теорию исследованного ориентационного фазового перехода в феррита-граната $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$;

выполнить экспериментальные исследования изменения доменной структуры феррита-граната $Tb_3Fe_5O_{12}$ в широком температурном интервале, включающем точку магнитной компенсации;

экспериментально определить магнитную фазовую *H*– *T* - диаграмму, определяющая границу между многодоменным и однодоменным (однородно намагниченным) состояниями феррита-граната $Tb_3Fe_5O_{12}$;

установить, влияние доменной структуры на процесс технического намагничивания феррита-граната $Tb_3Fe_5O_{12}$ вблизи T_c;

разработать теорию процесса технического намагничивания РЗФГ в температурной области, включающей T_c, учитывающая пининг доменных границ на дефектах кристаллической решетки, позволяющая описать наблюдаемое экспериментально в феррите-гранате $Tb_3Fe_5O_{12}$ изменение формы петли магнитного гистерезиса и величины поля технического насыщения при переходе температуры через точку магнитной компенсации;

исследовать магнитооптическим методом температурную зависимость смещения доменных границ в феррите-гранате $Tb_3Fe_5O_{12}$ под действием низкочастотного знакопеременного магнитного поля в окрестности T_c;

выявить характер температурной зависимости величины смещения доменных границ в феррите-гранате $Tb_3Fe_5O_{12}$ при приближении температуры к T_c;

развить феноменологическую теорию низкочастотного резонанса доменных границ в знакопеременном магнитном поле при переходе температуры через точку магнитной компенсации.

Объектами исследования являются монокристаллы редкоземельных ферритов-гранатов, номинально чистых (беспримесных) ферритов-гранатов $Tb_3Fe_5O_{12}$, $Dy_3Fe_5O_{12}$ и $Ho_3Fe_5O_{12}$, а также смешанных иттрий – тербиевые $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ и иттрий – гольмиевые $Ho_{0.6}Y_{2.4}Fe_5O_{12}$ ферриты - гранаты в виде плоскопараллельных пластинок толщиной ~100 мкм, развитые поверхности которых ориентировались параллельно кристаллографической плоскости (111) или (110).

Предметом исследования являются магнитные спин-переориентационные фазовые переходы в монокристаллах редкоземельных ферритов-гранатов, а также вызванных этими фазовыми переходами изменений доменной структуры и магнитных свойств редкоземельных ферритов-гранатов как коэрцитивная сила, подвижность доменных границ, форма петли гистерезиса, магнитная восприимчивость.

Методы исследования. В диссертационной работе применены следующие методы: магнитооптическая визуализация ДС; эффект Фарадея для исследовании динамики ДГ, петли магнитного гистерезиса и магнитной восприимчивости; визуализия с помощью поляризационного микроскопа; петли магнитного гистерезиса, смещение доменных границ и температурная зависимость магнитной восприимчивости были исследованы по стандартной интенсивностной методике в переменном магнитном поле, изменяющемся по гармоническому закону со звуковой частотой.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые проведены прямые визуальные наблюдения эволюции ДС феррита-граната $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ при спонтанной переориентации направления оси легкого намагничивания, и показано, что вблизи температуры исследо-

ванного фазового перехода магнитооптическая восприимчивость кристалла имеет узкий резкий максимум, а коэрцитивная сила – уменьшается;

предложена модель перестройки ДС феррита-граната $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ в температурной области спонтанной переориентации оси легкого намагничивания, позволяющая непротиворечиво описать (на качественном уровне) всю совокупность полученных экспериментальных результатов;

впервые выполнены экспериментальные исследования магнитного ориентационного фазового перехода, индуцированном двуосными механическими напряжениями в кубическом ферримагнетике;

развита феноменологическая теория индуцированного механическими напряжениями ориентационного фазового перехода в РЗФГ;

впервые выполнены экспериментальные исследования доменной структуры РЗФГ в температурной области, включающей температуру магнитной компенсации, которые показали, что вопреки некоторым существующим теориям при $H = 0$ при переходе температуры через точку магнитной компенсации доменная структура в кристалле не исчезает;

установлено, что вблизи точки магнитной компенсации ДС оказывает существенное влияние на процесс технического намагничивания феррита-граната $Tb_3Fe_5O_{12}$, и предложена модель процесса технического намагничивания ферримагнитного кристалла в температурной области, включающей температуру магнитной компенсации;

впервые исследована динамика доменных границ в РЗФГ в низкочастотном знакопеременном магнитном поле в окрестности температуры магнитной компенсации;

развита феноменологическая теория низкочастотного резонанса доменных границ в РЗФГ в знакопеременном магнитном поле.

Практические результаты исследования состоят в следующем:

температурные зависимости магнитного гистерезиса эффекта Фарадея и начальной магнитооптической восприимчивости феррита-граната $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ в температурной области спонтанной спиновой переориентации и температурной зависимости спонтанного эффекта Фарадея и перестройки ДС феррита-граната $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ при ориентационном фазовом переходе, индуцированном в кристалле планарными двуосными механическими напряжениями;

экспериментальные наблюдения эволюции доменной структуры феррита-граната $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ при спонтанной переориентации направления оси легкого намагничивания, магнитная фазовая *H–T* - диаграмма, определяющая границу между многодоменным и однодоменным (однородно намагниченным) состояниями феррита-граната $Tb_3Fe_5O_{12}$ и особенности влияния доменной структуры на процесс технического намагничивания феррита-граната $Tb_3Fe_5O_{12}$ вблизи температуры магнитной компенсации.

Достоверность результатов исследования обеспечена использованием комплекса современных магнитооптических методов исследования ДС и основных магнитных характеристик исследуемых в работе кристаллов РЗФГ; согласованностью экспериментальных результатов, полученных разными

методами, между собой, а также с результатами теоретических расчетов; анализом ошибок измерений; непротиворечивостью полученных результатов общефизическим представлениям и имеющимся литературным данным.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Результаты, полученные в результате исследований перестройки доменной структуры РЗФГ при спиновой переориентации, уточняют и конкретизируют ряд важных аспектов теории магнитных ориентационных фазовых переходов, а также расширяют современные представления физики магнитных доменов и наблюдаемый впервые эффект низкочастотного резонанса ДГ в переменном магнитном поле вблизи температуры магнитной компенсации РЗФГ актуален для развития микроскопической теории динамики ДГ в многоосных магнетиках и теории флексомагнитоэлектрического взаимодействия в ферримагнитных кристаллах.

Выявленные в результате выполненных исследований закономерности перестройки ДС, а также связанное с этим изменение таких важных для практических приложений физических свойств как магнитооптической восприимчивости, коэрцитивной силы и подвижности доменных границ РЗФГ при спин-переориентационных магнитных фазовых переходах могут быть использованы при разработке различных приборов магнитной микроэлектро-ники, в частности устройств, в которых применяется термомагнитный способ записи/стирания информации.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов ДС и магнитооптических свойств РЗФГ в области спин – переориентационных фазовых переходов:

магнитно-фазовая диаграмма тербий-ферритового граната вблизи точки магнитной компенсации использованы при изучении магнитных и структурных фазовых переходов в сложных магнитных системах при выполнении научного проекта № АААА-А17-117021310366-5 «Фазовые переходы, магнитотранспортные, магнитокалорические и магнитоэлектрические явления в сильнокоррелированных электронных системах» (справка института физики им. Х.И.Амирханова Российской Академии наук от 16 мая 2018 года № 17241/57). Исспользования научных результатов позволило описать магнитное состояние редкоземельных ферритов-гранатов вблизи точки магнитной компенсации;

температурная зависимость эффекта Фарадея в окрестности критической температуры, а также развитая феноменологическая теория используется при исследовании магнитных и структурных переходов, проведенных в рамках проекта РНФ 14-22-00279 «Фундаментальные поисковые исследования в области магнетизма, фазовых превращений, магнитоэлектроники и микросистемной техники» (Справка института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской Академии наук от 4 апреля 2018 года № 11210-2173-220). Исспользование научных результатов позволило изучить спин-переориентационный фазовый переход в магнетиках;

разработанная модель перестройки доменной структуры феррита-граната $Tb_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$ в температурной области спонтанной спиновой

переориентации были использованы при выполнении исследований в лаборатории сверхпроводимости и машиностроительного производство Рузаевского института машиносторения для изучения напряженных состояний конструкционных элементов (Справка Рузаевского института машиностроения от 10 апреля 2018 года № 20-01-722, Россия). Исспользование научных результатов позволило анализировать напряженные состояния конструктивных элементов;

полученная модель процесса технического намагничивания ферримагнитного кристалла в температурной области, включающей температуру магнитной компенсации использованы при выполнении фундаментального гранта Ф2-ФА-0-83921/Ф2-ФА-Ф0383 «Сильно корреляционные взаимодействия в сверхпроводниках и магнитных материалах и их критические параметры» (2012-2016) для исследования критических параметров магнитных материалов. (Справка Министерство высшего и средне специального образования от 11 апреля 2018 года № 89-03-1371). Использование научных результатов позволило вычислить сильно корреляционные взаимодействия в сверхпроводниках;

исследования магнитного ориентационного фазового перехода, индуцированном двухосными механическими напряжениями в кубическом ферримагнетике использованы при выполнении фундаментального гранта ОТ-Ф2-64 «Флуктуационные и параметрические явления в конденсированных и нано-размерных системах» (2017-2020) для получения выражения свободной энергии макроскопических систем. (Справка Министерство высшего и средне специального образования от 11 апреля 2018 года № 89-03-1371). Использование научных результатов позволило применить в разработке различных приборов и устройств магнитной микроэлектроники, работа которых основана на изменении доменной конфигурации магнитных структур.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были доложены и апробированы на 18 международных и 12 республиканских научных конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 64 научные работы, из них 1 монография, 16 статей в журналах рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы из 134 наименований. Текст диссертации изложен на 200 страницах машинописного текста, включая 29 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выявлены объект и предмет исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложена научная новизна исследования, раскрыты теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения о внедрении результатов, представлены сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Типы магнитного упорядочения кристаллов, магнитные ориентационные фазовые переходы и основные физические свойства редкоземельных ферритов - гранатов»** представлены основные сведения из теории фазовых переходов Ландау, а также рассматриваются: виды магнитного упорядочения кристаллов; кристаллическая и магнитная структуры РЗФГ; ДС, магнитные, оптические и магнитооптические свойства этих ферримагнетиков; динамика ДГ в РЗФГ. На основе проведённого литературного обзора было получено заключения о том, что РЗФГ обладает уникальными физическими свойствами имеющие важное научное и практическое значение. Это обосновывает, что исследование ориентационных фазовых переходов (ОФП) в РЗФГ представляют собой актуальную проблему.

Во второй главе **«Основные характеристики редкоземельных ферритов-гранатов, экспериментальные установки и методика исследований»** приводится описание используемых образцов, приборов, методов и техники экспериментальных исследований ДС, магнитных и магнитооптических свойств РЗФГ.

В экспериментах использовались как номинально чистые (беспримесные) монокристаллы РЗФГ $Tb_3Fe_5O_{12}$, $Dy_3Fe_5O_{12}$ и $Ho_3Fe_5O_{12}$, так и смешанные иттрий-тербиевого и иттрий-гольмиевого гранаты составов $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ и $Ho_{0.6}Y_{2.4}Fe_5O_{12}$ соответственно, выращенные методом спонтанной кристаллизации из раствора в расплаве. Выбор этих РЗФГ не случаен: гранаты $Tb_3Fe_5O_{12}$, $Dy_3Fe_5O_{12}$ и $Ho_3Fe_5O_{12}$ имеют точку магнитной компенсации выше температуры кипения жидкого азота; температура спонтанной спиновой переориентации граната $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ выше 100 К, а $Ho_{0.6}Y_{2.4}Fe_5O_{12}$ характеризуется относительно небольшой магнитной анизотропией, что позволяет проводить исследования магнитных ОФП в этих РЗФГ в условиях нашего эксперимента. Исследуемые образцы представляли собой плоскопараллельные пластинки толщиной ~ 100 мкм с поперечными размерами ~ 2 × 3 мм, развитые поверхности которых были параллельны либо кристаллографической плоскости (110), либо (111).

ДС образцов исследовалась визуально «на просвет» при помощи поляризационного микроскопа с использованием стандартной магнитооптической (фарадеевской) методики. В фокальной плоскости микроскопа исследуемый образец ориентировался так, чтобы всегда существовала

проекция вектора спонтанной намагниченности во всех доменах на направление падающего света. Контраст получаемых изображений ДС образца обусловливался, в основном, различной величиной и/или разным знаком фарадеевского вращения в соседних доменах.

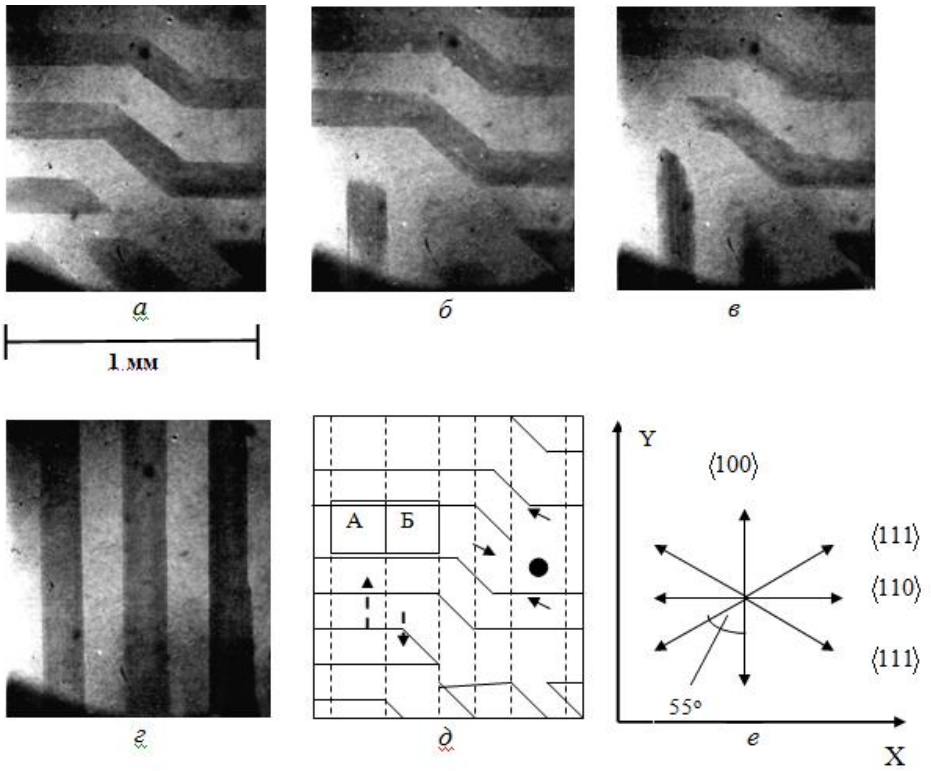
Разработанная экспериментальная установка, позволяет проводить исследования полевой и температурной зависимостей эффекта Фарадея в статичных магнитных полях напряженностью $H \leq 120$ Э, а также начальной магнитооптической восприимчивости и петель магнитного гистерезиса в низкочастотном магнитном поле, изменяющемся по гармоническому закону с амплитудой $H_o \leq 60$ Э. Все эксперименты проводились с использованием азотного оптического криостата, позволяющего проводить исследования в температурном интервале 85 ÷ 295 К при средней скорости изменения температуры исследуемого образца ~ 0,2 ÷ 0,3 К/с.

Третья глава **«Доменная структура и магнитооптические свойства редкоземельных ферритов – гранатов в условиях спонтанной или индуцированной механическими напряжениями переориентации направления оси легкого намагничивания»** посвящена исследованиям перестройки ДС феррита-граната $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ при спонтанной переориентации направления оси легкого намагничивания (О.Л.Н).

Основные этапы эволюции ДС исследованного образца в температурной области ОФП $\Phi_{111} \rightarrow \Phi_{100}$ иллюстрирует рис.1. При охлаждении образца от комнатной температуры до $T \approx 116$ К его ДС практически не изменялась (рис. 1 *а*). Заметная перестройка ДС наблюдалась в интервале $105<T<115$ К (рис. 1 *б-г*). При понижении T от 115 до 105 К сначала контрастность изображений соседних доменов уменьшалась вплоть до того, что в некоторой области образца изображение доменов пропадало, а на месте старых доменов возникали новые домены с ДГ, параллельными направлению ⟨100⟩ (визуально изображение новых доменов появляется как «из тумана»). По мере понижения температуры количество новых доменов увеличивалось, причем ширина новых доменов практически не менялась, а их длина – росла, в результате чего при $T \approx 105$ К новые домены «прорастали» на всю наблюдаемую площадь образца. Ниже $T = 105$ К четкость изображения ДС восстанавливалась, а ее вид оставался без заметных изменений вплоть до минимально достижимой в эксперименте $T = 85$ К. При повышении температуры от $T = 85$ К эволюция ДС образца происходила в обратном порядке.

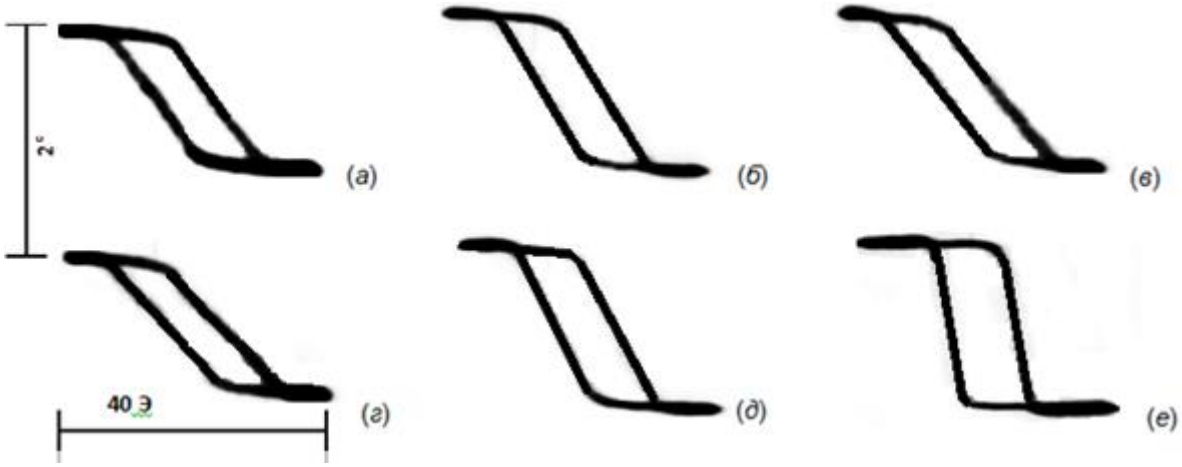
А также в этой главе изучены влияния перестройки ДС на его магнитооптическую восприимчивость и коэрцитивную силу. На рис. 2 показаны полевые зависимости эффекта Фарадея в этом же образце, полученные при частоте перемагничивающего поля 25 Гц при **H** ‖ ⟨111⟩ в температурной области перестройки его ДС.

Как видно из рис. 2, вблизи температуры ОФП петля гистерезиса сужается (уменьшается коэрцитивная сила H_c), а зависимость $\Phi_F(H)$ вдали от насыщения – приближается к линейной.



Полученные при различной температуре: *а* – Т = 116, *б* - 114, *в* – 112, *г* – 104 К, *д* – схематическое изображение реализующихся равновесных доменных конфигураций образца: сплошными линиями и сплошными стрелками показаны соответственно ДГ и направления спонтанного магнитного момента в доменах фазы $Ф_{111}$, пунктирными линиями и пунктирными стрелками – то же для фазы $Ф_{100}$; А и Б – участки образца, в которых при переориентации легкой оси векторы локального спонтанного магнитного момента разворачиваются в противоположные стороны. е - ориентация главных кристаллографических направлений в плоскости образца и осей лабораторной системы координат.

Рис.1. Изображения доменной структуры образца



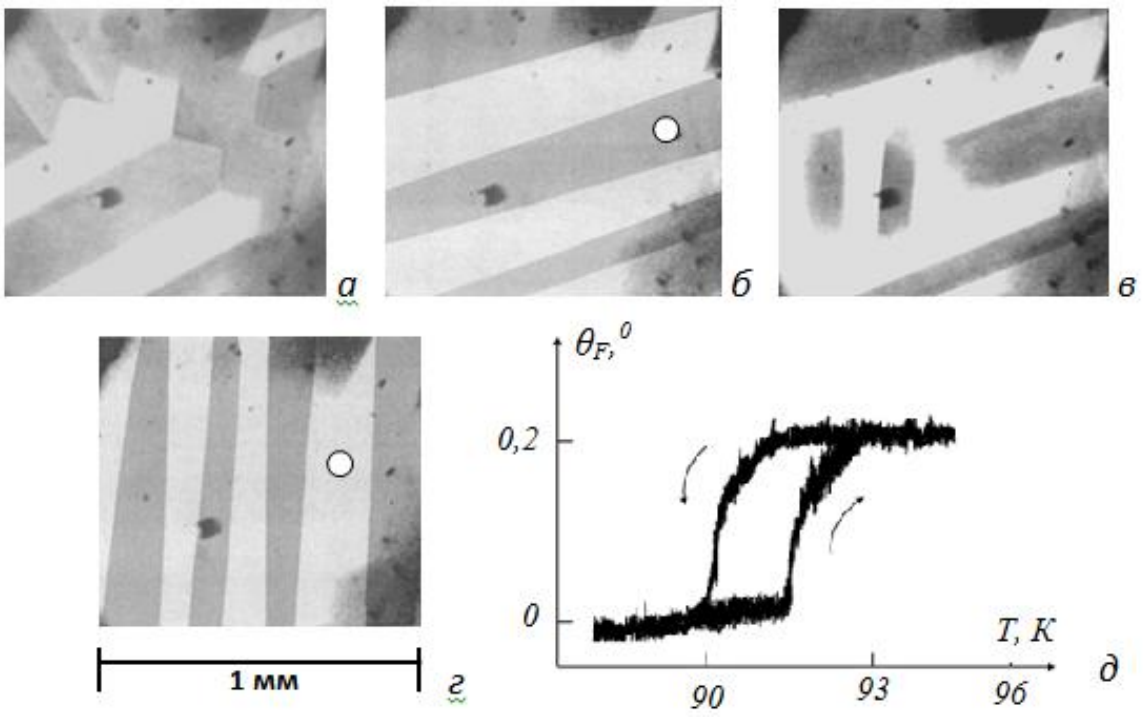
Полученные при температуре: Т=150 К (а), 130 (*б*), 112 (*в*), 110 (*г*), 100 (*д*) и 85 К (*е*)

Рис. 2. Осциллограммы петель магнитного гистерезиса эффекта Фарадея в исследованном образце

Известно, что безгистерезисная кривая намагничивания характерна для процесса вращения $\mathbf{M}_s$. Поэтому можно заключить, что вблизи точки спиновой переориентации магнитные свойства исследованного образца определяются в основном поворотом вектора $\mathbf{M}_s$ к направлению намагничивания.

Предложена модель перестройки ДС феррита-граната $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ в температурной области спонтанной переориентации О.Л.Н., позволяющая непротиворечиво описать (на качественном уровне) всю совокупность полученных экспериментальных результатов. Последнее позволяет сделать выбор в пользу флуктационного механизма зародышеобразования доменов новой магнитной фазы в процессе переориентации направления О.Л.Н.

Здесь же представлены результаты экспериментальных исследований температурной зависимости спонтанного эффекта Фарадея и эволюции ДС феррита-граната $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ при ОФП, индуцированном в нем планарными двуосными механическими напряжениями (Рис.3). Для создания в кристалле механических напряжений заданной симметрии, исследуемый образец определенным образом наклеивался на медную шайбу и охлаждался до температуры жидкого азота; при понижении температуры от комнатной за счет уменьшения радиуса шайбы и разницы в коэффициентах теплового расширения меди и феррита-граната $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ и возникают механические напряжения его кристаллической решетки.



Полученные при различной температуре: *а* – Т = 85 К (ненапряженный образец), *б* – 100, *в* – 93, *г* – 90 К, *д* - температурная зависимость спонтанного эффекта Фарадея

Рис. 3. Изображения доменной структуры исследованного образца

Как видно из рис. 3 *а-г* ДС существует в «приклеенном» образце до $T \approx$ 93 К, ниже которой наблюдается уменьшение контраста ее изображения, при этом на месте старых доменов скачком возникают новые прямоугольные домены, ориентированными вдоль оси $\langle 100 \rangle$. Длина новых доменов растет с понижением температуры и при $T \approx 90$ К новые домены «прорастают» на всю наблюдаемую площадь образца, а ее вид не изменяется вплоть до минимально достижимой в эксперименте $T = 85$ К.

Из рис. 3 *д* видно что, в этой геометрии эксперимента при охлаждении «приклеенного» образца ниже $T = 90$ К спонтанный эффект Фарадея обращается в нуль. Следовательно, при $T < 90$ К в образце в точке измерения отсутствует проекция локального вектора $\mathbf{M}_s$ на направление распространения света. Значение $T = 90$ К близко к температуре, при которой заканчивается перестройка ДС «приклеенного» образца. Учитывая, что свет фокусировался в точке, расположенной в центре доменов, можно заключить, что в реализующейся при $T < 90$ К ДС «приклеенного» образца вектор $\mathbf{M}_s$ не выходит из плоскости (110) и ориентирован вдоль направления $\langle 100 \rangle$ (вдоль оси *Y*).

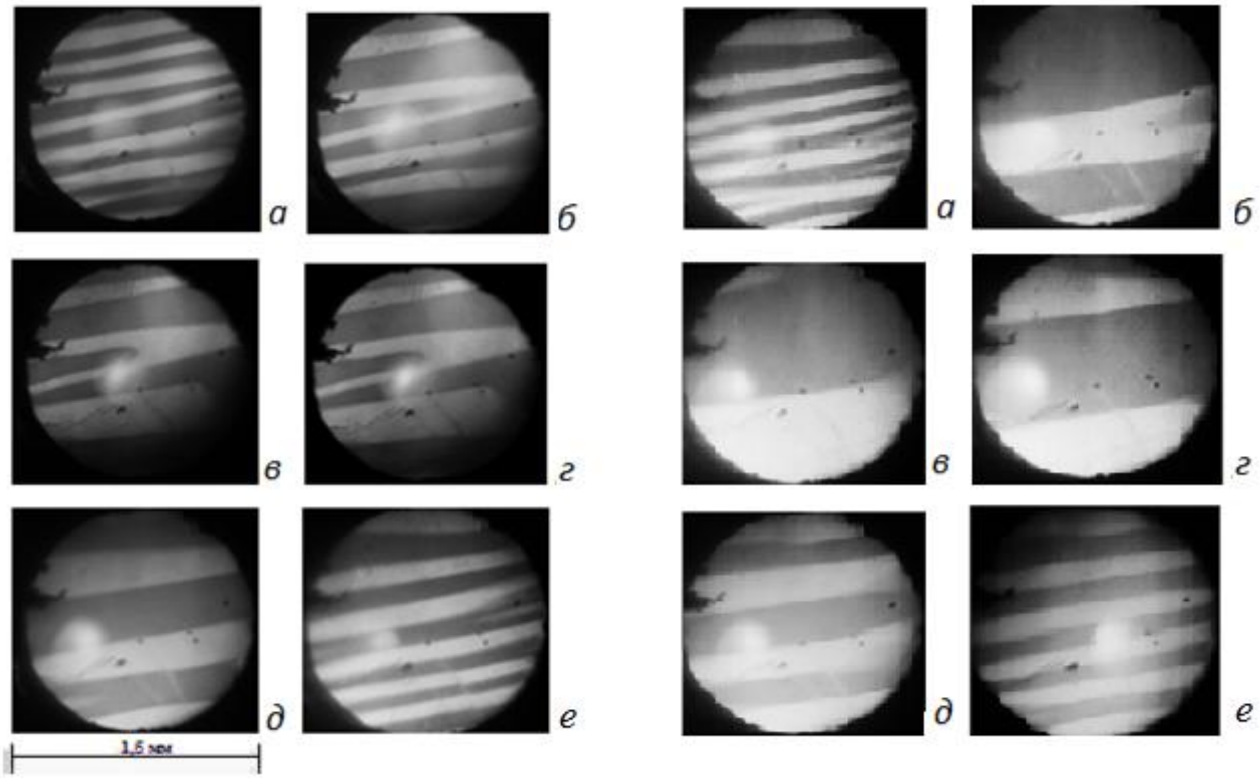
На основе термодинамического потенциала двуоснонапряженного кубического кристалла развита феноменологическая теория исследованного ОФП, из которой, в частности, следует, что в зависимости от соотношения между величинами константы кубической анизотропии K_1 и констант анизотропии, наведенной в кристалле двухосными напряжениями, K_{100} и K_{110}, а также соотношения величин констант K_{100} и K_{110} между собой, переориентация направления спонтанного магнитного момента кубического кристалла под действием механических напряжений происходит как фазовый переход либо I-ого (переориентация О.Л.Н. происходит скачком), либо II-ого рода (О.Л.Н. плавно меняет направление от одной кристаллографической оси к другой).

Переход начальной магнитной фазы с $\vec{M}_s \| \langle 111 \rangle$ в фазу с $\vec{M}_s \| \langle 100 \rangle$ при $(K_{100} - K_{110}) = |K_1|$ происходит скачком (переход I -ого рода), а в фазу с $\vec{M}_s \| \langle 110 \rangle$ при $(K_{110} - K_{100}) = |K_1|/2$ – непрерывно (переход II -ого рода). Следовательно, в зависимости от соотношения между величинами констант K_{100} и K_{110} картина перестройки ДС «приклеенного» образца должна принципиально меняться: в первом случае при понижении температуры домены с $\vec{M}_s \| \langle 100 \rangle$ должны возникать скачком, что наблюдается в нашем эксперименте; во втором случае-переориентация $\mathbf{M}_s$ в доменах должна происходить плавно.

В четвертой главе **«Доменная структура, динамика доменных границ и магнитооптические свойства тербиевого феррита – граната вблизи точки магнитной компенсации»** описываются результаты наблюдения изменения доменной структуры феррита-граната $Tb_3Fe_5O_{12}$ в температурной области в окрестности точки магнитной компенсации, на основании которых определена магнитная фазовая *H – T*- диаграмма, опре-деляющая границу между многодоменным и однодоменным состояниями феррита-граната $Tb_3Fe_5O_{12}$.

В качестве примера на рис. 4 (1-серия) приведен ряд фотографий, полученных в процессе нагрева образца от T = 85 К (скорость нагрева ~ 0,2 К/с), иллюстрирующих общий характер изменения его ДС в зависимости от температуры. Каждая фотография 2 серии, показанные на рис. 4 дают изображение ДС после размагничивания образца при заданной T в знакопеременном магнитном поле (изменяющемся с частотой 50 Гц), амплитуда которого убывала от максимального значения H = 60 Э до нуля.

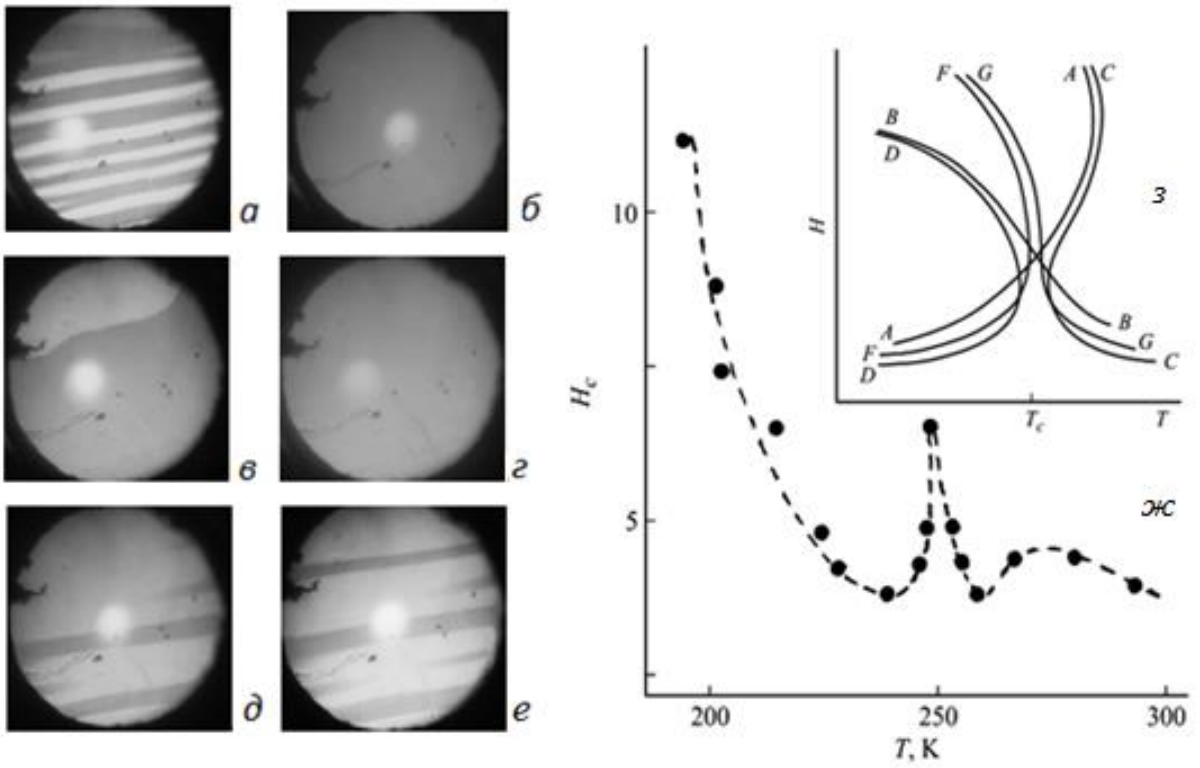
Монодоменное состояние образца можно было наблюдать под действием внешнего поля **H,** имеющего заметную проекцию на направление доменных границ. Как видно из рис. 5 *а-е* – Монодоменное состояние образца возникает в некотором температурном интервале справа и слева от T_c. Экспериментально определена магнитная фазовая H – T-диаграмма (рис. 5 *ж*). Из сравнения полученных диаграмм делается вывод, что существование ДС в феррите-гранате $Tb_3Fe_5O_{12}$ в окрестности T_c связано с переходом кристалла в неколлинеарную магнитную фазу, AA и BB – линии потери устойчивости фаз соответственно ($\varphi = 0$) и ($\varphi = \pi$), CC и FF – границы области устойчивости состояний ($0 < \varphi < \pi/2$, $\xi = \pi/2, 7\pi/6, 11\pi/6$), DD и GG – границы области устойчивости состояний ($\pi/2 < \varphi < \pi$, $\xi = \pi/6, 5\pi/6, 3\pi/2$), где φ и ξ – соответственно полярный и азимутальный углы вектора $\mathbf{M}_{Fe}$ в декартовой системе координат $\{[1\bar{1}0], [11\bar{2}], [111]\}$ (ось [111] – полярная ось).



1-серия 2-серия

Полученные при разной температуре в процессе его отогрева: T = 205 (а), 236 (б), 248 (в), 251 (г), 256 (д) и 295 К (е). (Во 2 серии, при каждой температуре образец подвергался размагничиванию в поле убывающей до нуля амплитудой)

Рис. 4. Изображения доменной структуры образца



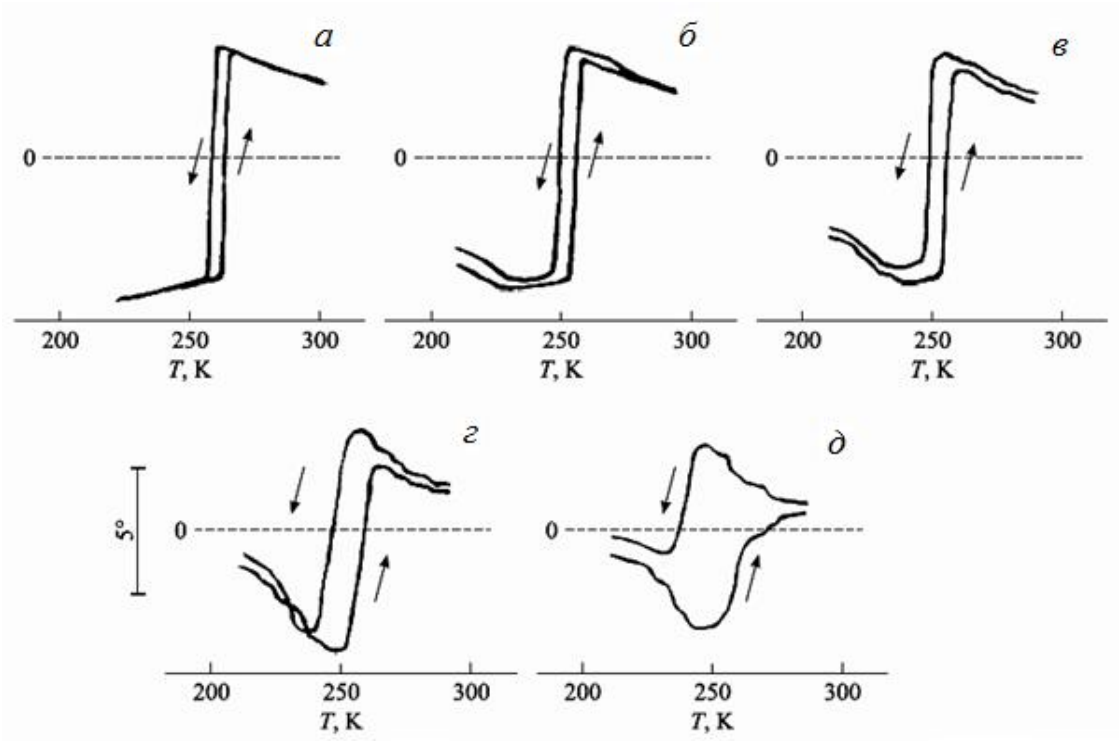
Полученные при разной температуре в процессе его отогрева в магнитном поле H = 4,5 Э: *а* - Т = 200 К, *б* - 240, *в* - 246, *г* - 260, *д* – 270, *е* - 295 К. При каждой температуре образец подвергался размагничиванию в знакопеременном магнитном поле с убывающей до нуля амплитудой. Вектор Н параллелен О.Л.Н. *ж* – температурная зависимость напряженности магнитного поля при котором образец переходит в монодоменное состояние, *з* - фазовая H – T – диаграмма, описывающая магнитное состояние РЗФГ при **H** ||| [111]

Рис. – 5. Изображения доменной структуры образца и температурная зависимость напряженности магнитного поля

Таким образом, выполненные исследования показали, что в плоскопараллельной пластинке феррита - граната $Tb_3Fe_5O_{12}$ при H = 0 при переходе температуры через точку магнитной компенсации ДС не исчезает. Это существование ДС в феррите-гранате $Tb_3Fe_5O_{12}$ в окрестности T_c связано с переходом кристалла в неколлинеарную магнитную фазу, в которой угол между векторами магнитных моментов железной и редкоземельной подрешеток отличен от 180°.

На рис. 6 представлены графики температурной зависимости эффекта Фарадея, полученные при различных значениях магнитного поля, ориентированного вдоль среднего направления ДГ. Видно, что полученные кривые $\Phi_F(T)$, более наглядны в плане при переходе температуры через точку компенсации при нагреве и охлаждении образца.

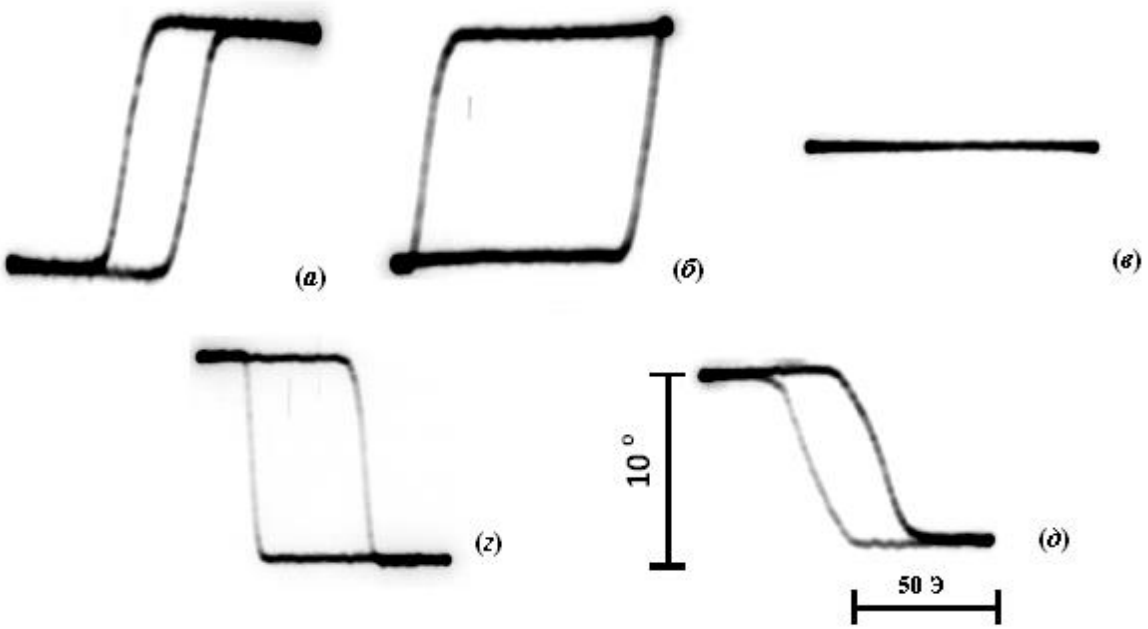
Отметим, что близкие к представленным на рис. 6 температурные зависимости эффекта Фарадея наблюдались в слабых магнитных полях в окрестности T_c в $Dy_3Fe_5O_{12}$, однако удовлетворительного объяснения изменения формы наблюдаемых кривых $\Phi_F(T)$ при изменении температуры и магнитного поля на момент начала работы над диссертацией не было.



Полученные при разных значениях поля Н: 35(*а*), 15 (*б*), 10 (*в*), 3 (*г*) и 2 Э (*д*)

Рис. 6. Температурные зависимости эффекта Фарадея в исследованном образце

На рис.7 представлен ряд осциллограмм петель магнитного гистерезиса эффекта Фарадея, полученных при нагреве образца при ориентации вектора **H** вдоль среднего направления доменных границ при различной температуре,



Полученные при разной температуре: 200 (*а*), 241 (*б*), 249 (*в*), 268 (*г*) и 280 К (*д*) (вектор Н параллелен среднему направлению доменных границ)

Рис. 7. Осциллограммы петель магнитного гистерезиса эффекта Фарадея в исследованном образце

из которых видно, что при $T \to T_c$ ширина петли гистерезиса растет, однако в непосредственной близости к T_c петля гистерезиса практически скачком схлопывается, превращаясь в горизонтальную прямую. «Схлопнутая» петля гистерезиса эффекта Фарадея наблюдается в температурном интервале 245 ÷ 247 К при охлаждении образца и в интервале 248 ÷ 250 К при его нагреве. Таким образом, за исключением этих температурных интервалов используемое в эксперименте переменное магнитное поле амплитудой H = 60 Э создает условие полного перемагничивания образца во всей интересующей нас области температур. Это позволило на основе полученных петель гистерезиса определить температурную зависимость коэрцитивной силы образца вблизи T_c.

Поскольку в настоящее время не существует законченной микроскопической теории подвижности ДГ в РЗФГ, при интерпретации результатов, полученных при исследованиях процесса технического намагничивания феррита -граната $Tb_3Fe_5O_{12}$ вблизи T_c, будем исходить из термодинамической теории полосовой 180° – ной ДС.

Известно, что положение доменных границ во внешнем поле H в идеальном кристалле определяется балансом между его зеемановской и магнитостатической энергиями и зависит от геометрических размеров исследуемого образца. В этом случае среднее смещение доменной границы из положения равновесия при $\boldsymbol{H}$, направленном вдоль О.Л.Н. может быть определено из условия

$$2M_s H = kx, \tag{1}$$

где k -постоянная возвращающей силы (коэффициент упругости), x- величина смещения доменной границы под действием H относительно положения равновесия. При этом угол Фарадеевского вращения

$$\Phi_F = \theta_F (S_+ - S_-)/S = A\theta_F x, \tag{2}$$

где S – засвеченная площадь образца, S_+ и S_- – площади доменов с противоположной ориентацией вектора $\mathbf{M}_s$, A – коэффициент пропорциональности, θ_F - спонтанный эффект Фарадея, описывающийся формулой

$$\theta_F = \left(a\vec{M}_{Fe}\cos\theta_1 + bM_R\cos\theta_2\right)l, \tag{3}$$

где a и b – зависящие от частоты света магнитооптические коэффициенты; θ_1, θ_2 – углы, образованные векторами $\mathbf{M}_{Fe}$ и $\mathbf{M}_R$ с нормалью к плоскости образца (в коллинеарной магнитной фазе кристалла $\theta_1 = \theta_2$); l – толщина образца.

Однако, в реальном образце достаточно больших размеров основной причиной, определяющей положение доменных границ, является пространственное распределением центров пининга в его кристаллической решетке. С учетом последнего на основании (1) величину поля технического насыщения намагниченности можно представить как

$$H_н = H_p + kw/4M_s, \tag{4}$$

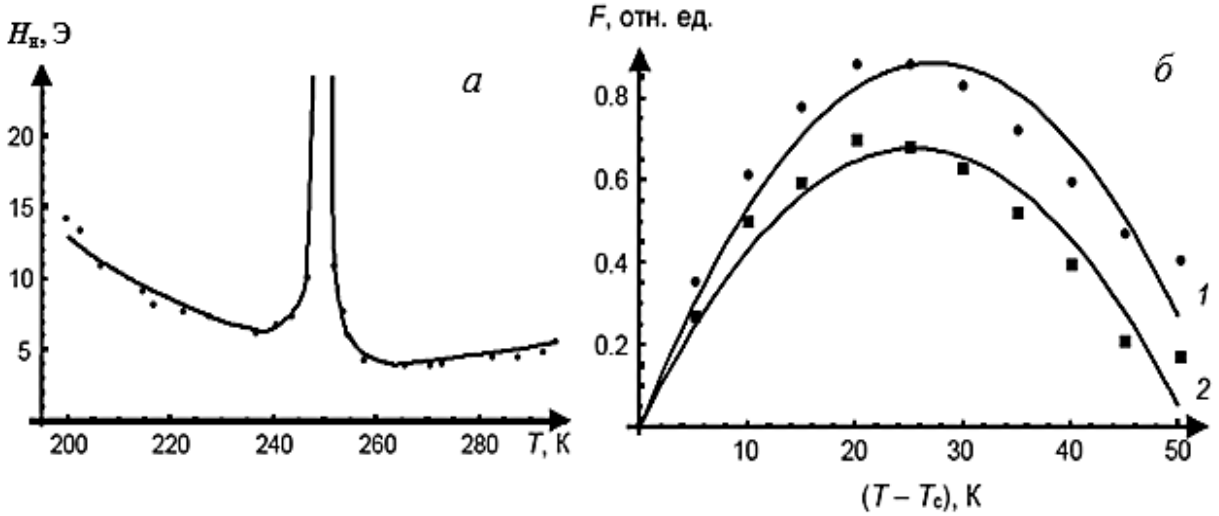
где w – ширина домена ($x = w/2$ – максимально возможное смещение доменной границы), а уравнение (2) переписать в виде

$$F = \Phi_F / \theta_F = 2AM_s\left(H - H_p\right)/k\,, \qquad (5)$$

Поскольку $\theta_F \propto M_s$, можно считать, что зависимости $F(T)$ и $F(H)$ в полной мере отражают ход температурной и полевой зависимостей намагниченности кристалла.

Если предположить, что центрами пининга ДГ являются микроскопические скопления немагнитных примесей, содержащихся в кристалле, то $H_p = \vartheta M_s$, где ϑ – коэффициент, зависящий от количества дефектов, их формы и размеров. В этом случае, используя известные данные по температурной зависимости $M_s(T)$ феррита-граната $Tb_3Fe_5O_{12}$, можно рассчитать по (4) и (5) зависимости $H_н(T)$ и $F(T)$, и сравнить их с соответствующими экспериментальными результатами.

Результаты подгонки функций $H_н(T)$ и $F(T)$ к экспериментальным данным показаны на рис. 8.



а - переход в однодоменное состояние: сплошная линия – расчет по (4), точки – эксперимент, *б* - кривые полученные при разной напряженности поля *H*: кривая 1 – 3 Э, кривая 2 – 2 Э. Сплошные линии – расчет по (5), точки – эксперимент

Рис. 8. Температурная зависимость напряженности внешнего магнитного поля и величины отношения Φ_F/θ_F

Из сравнения графиков, представленных на рис. 8 *а* и б видно, что формулы (4) и (5) достаточно хорошо описывают результаты двух независимых экспериментов: визуального наблюдения изменения ДС образца при его намагничивании и температурной зависимости эффекта Фарадея.

Следовательно, можно заключить, что, несмотря на ряд сделанных оговорок и приближений, упрощающих реальную ситуацию, используемая модель изменения ДС кристалла при изменении *H* и *T* позволяет корректно (по крайней мере, на качественном уровне) описать все выявленные закономерности процесса технического намагничивания феррита-граната $Tb_3Fe_5O_{12}$ при переходе температуры через точку магнитной компенсации.

Экспериментально исследовалась также температурная зависимость угла фарадеевского вращения в области $200 \le T \le 295$ К, включающей точку компенсации $Tb_3Fe_5O_{12}$. На рис. 9 показаны температурные зависимости угла

$|\Phi_F|$, полученные при нагреве образца от T = 85 К в переменном магнитном поле, изменяющемся с частотой 25 и 75 Гц. Как видно из рис. 9 при $T \to T_c$ сначала величина $|\Phi_F|$ растет, достигая некоторого максимального значения, после чего резко падает практически до нуля; причем значение $\Phi_F \approx 0$ наблюдается в достаточно широком (≈ 10 К) интервале температур.

Для интерпретации немонотонного характера температурной зависимости величины смещения доменных границ при приближении к температуре магнитной компенсации нами предложена феноменологическая теория движения доменных границ, согласно которой уравнение движения имеет вид

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt}\alpha + kx = 2M_sH_o\cos\omega t \qquad (6)$$

Здесь: x – смещение доменной границы, m – масса единицы поверхности доменной границы, α – параметр вязкого трения (коэффициент затухания), k – постоянная возвращающей силы (коэффициент упругости), H_0 – амплитудное значение магнитного поля и ω – его круговая частота, $\boldsymbol{M_s}$ – спонтанный магнитный момент.

В установившемся режиме вынужденных колебаний доменных границ решение уравнения (6) в стандартных обозначениях имеет вид

$$x = X_o[(\omega_o^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2]^{-1/2}\cos(\omega t - \delta) \qquad (7)$$

где $\omega_0 = (k/m)^{1/2}$ – собственная частота колебаний доменных границ, $2\beta = \alpha/m$, $X_0 = 2M_sH_0/m$, $\delta = arctg2\omega\beta/\omega_0^2 - \omega^2$ – начальная фаза колебаний.

Используя (7), можно привести выражение (2) к виду, удобному для компьютерной обработки

$$F(T) = \left[\frac{(\Phi_F/\theta_F)}{(\Phi_F/\theta_F)_{\max}}\right]^2 = \left(\frac{x}{x_{\max}}\right)^2 = \frac{M_s^2}{M_{Fe}^2}\left(A + B\frac{M_{Fe}^2}{M_s^2} + C\frac{M_{Fe}^4}{M_s^4}\right)^{-1}, \qquad (8)$$

где $(\Phi_F/\theta_F)_{\max}$ – максимальное значение функции $(\Phi_F/\theta_F)(T)$,

$A = (k^2 + \alpha^2\omega^2)2\pi\alpha^2k\Delta\gamma_{Fe}^2$, $B = 2(\omega/2\pi\Delta\gamma_{Fe}^2)^2$, $C = \omega^4/8\pi^3\alpha^2k\Delta^3\gamma_{Fe}^6$.

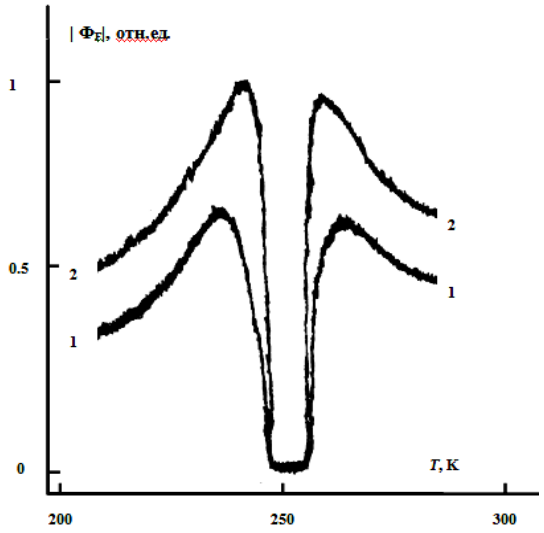
На рис. 10 рассчитанная по (8) зависимость $[x(T)/x_{\max}]^2$ сравнивается с экспериментальной зависимостью $F(T)$, полученной на основе температурной зависимости эффекта Фарадея в $Tb_3Fe_5O_{12}$ (ν = 75 Гц), представленной на рис. 9. Из приведенных на рис. 10 графиков видно, что рассчитанная зависимость $[x(T)/x_{\max}]^2$ отражает основные черты изменения угла $|\Phi_F|$ при изменении температуры.

Далее анализируя условие резонанса

$$\omega^2 = \frac{k}{m} - \frac{\alpha^2}{2m^2} = 2k\pi\Delta\left(\gamma_{Fe}\frac{M_s}{M_{Fe}}\right)^2 - 2(\alpha\pi\Delta)^2\left(\gamma_{Fe}^2\frac{M_s}{M_{Fe}}\right)^4 \qquad (9)$$

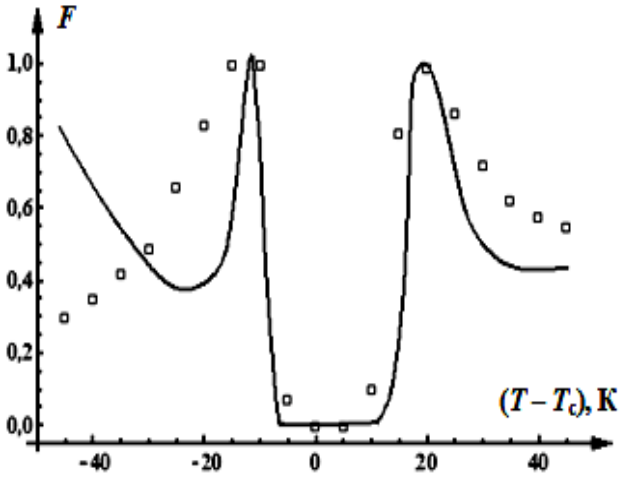
и учитывая, что вблизи T_c $\mathbf{M_s}\to 0$ и $m\to\infty$, придем к выводу, что при приближении температуры к точке компенсации резонансные частоты поля существенно сдвигаются в низкочастотную область. Кроме того, отсюда следует,

что с ростом ω максимумы кривой $x(T)/x_{max}$ смещается вправо и влево от T_c, которое согласуется с экспериментальными результатами (см. рис. 10) (x_{max} – максимальное значение амплитуды смещения доменной границы).



1 – ν = 75 Гц, H_o = 0,2 Э; 2 – ν = 25 Гц, H_o = 0,3 Э. Скорость изменения температуры – 0,2 К/с

Рис. 9. Температурные зависимости эффекта Фарадея в исследованном образце



Точки – эксперимент, сплошная линия – результат подгонки функции (8) к экспериментальным точкам

Рис. 10. Температурная зависимость величины *F*

Кроме того, исследуя температурной зависимости скорости движения доменных границ, придем к заключению, что при приближении температуры к точке магнитной компенсации скорость движения доменных границ должна расти, а в непосредственной близости к T_c должен существовать конечный интервал температур, где эта скорость равна нулю (следовательно и угол фарадеевского вращения тоже равна нулю).

Именно такое изменение скорости смещения доменных границ при $T \rightarrow T_c$ вытекает из наблюдаемых экспериментально петель гистерезиса эффекта Фарадея.

Таким образом, предложенная теория позволяет непротиворечиво описать экспериментальные результаты (по крайней мере, на качественном уровне) температурной зависимости магнитооптической воспримчивости феррита – граната при переходе температуры через точку магнитной компенсации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Впервые проведены прямые визуальные наблюдения эволюции доменной структуры феррита-граната $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ при спонтанной переориентации направления оси легкого намагничивания. Показано, что

исследованный ориентационный фазовый переход «растянут» в некотором температурном интервале, в котором сосуществуют домены низкотемпературной и высокотемпературной магнитных фаз, а перестройка доменной конфигурации кристалла сопровождается заметным температурным гистерезисом.

2. Установлено, что процесс технического намагничивания кристалла в температурной области спиновой переориентации определяется в основном разворотом вектора спонтанного магнитного момента $\mathbf{M}_s$ в сторону вектора намагничивающего поля **H**. Показано, что вблизи температуры исследованного фазового перехода магнитооптическая восприимчивость кристалла имеет узкий резкий максимум, а коэрцитивная сила – уменьшается.

3. Предложена модель перестройки доменной структуры феррита-граната $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ в температурной области спонтанной переориентации оси легкого намагничивания, позволяющая непротиворечиво описать (на качественном уровне) всю совокупность полученных экспериментальных результатов. При обсуждении физических причин температурного гистерезиса перестройки доменной структуры кристалла в области спиновой переориентации предпочтение отдается флуктационному механизму зародышеобразования доменов новой магнитной фазы.

4. Впервые выполнены экспериментальные исследования магнитного ориентационного фазового перехода, индуцированном двуосными механическими напряжениями в кубическом ферримагнетике. В качестве объекта этих исследований выбран феррит-гранат $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$, характеризующийся относительно небольшой величиной естественной кристаллографической анизотропии, что позволило с помощью внешних механических напряжений изменять ориентацию спонтанного магнитного момента в кристалле. Из исследований изменения величины спонтанного эффекта Фарадея в двуоснонапряженном образце феррита-граната $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ и эволюции его доменной структуры установлено, что данный магнитный ориентационный фазовый переход I – ого рода и сопровождается заметным гистерезисом.

5. На основе термодинамического потенциала двуоснонапряженного кубического кристалла развита феноменологическая теория исследованного ориентационного фазового перехода, из которой, в частности, следует, что в зависимости от соотношения между величинами константы кубической анизотропии K_1 и констант анизотропии, наведенной в кристалле двухосными напряжениями, K_{100} и K_{110}, а также соотношения величин констант K_{100} и K_{110} между собой, переориентация направления спонтанного магнитного момента кубического кристалла под действием механических напряжений происходит как фазовый переход либо I – ого (переориентация оси легкого намагничивания происходит скачком), либо II – ого рода (ось легкого намагничивания плавно меняет свое направление от одной кристаллографической оси к другой).

6. Выполнены экспериментальные исследования доменной структуры плоскопараллельной пластинки феррита-граната $Tb_3Fe_5O_{12}$ в температурной

области, включающей температуру магнитной компенсации, которые показали, что вопреки некоторым существующим теориям при $H = 0$ при переходе температуры через точку магнитной компенсации доменная структура в кристалле не исчезает.

7. Определено, магнитная фазовая $H - T -$ диаграмма, описывающая магнитное состояние редкоземельных ферритов-гранатов вблизи температуры магнитной компенсации. Согласно которой при переходе температуры через точку компенсации нарушается строго антипараллельная ориентация магнитных моментов железной $\mathbf{M}_{Fe}$ и редкоземельной $\mathbf{M}_R$ подрешеток, т.е. энергетически выгодным становится состояние кристалла со скошенными друг относительно друга векторами $\mathbf{M}_{Fe}$ и $\mathbf{M}_R$, в результате чего результирующая намагниченность $\mathbf{M}_{Fe} + \mathbf{M}_R$ не обращается в нуль.

8. Установлено, что вблизи точки магнитной компенсации доменная структура оказывает существенное влияние на процесс технического намагничивания феррита-граната $Tb_3Fe_5O_{12}$, при этом известные нам теории не позволяют адекватно описать всю совокупность полученных экспериментальных результатов.

9. Предложена модель процесса технического намагничивания ферримагнитного кристалла в температурной области, включающей температуру магнитной компенсации, учитывающая пининг доменных границ на дефектах его кристаллической решетки. Показано, что предложенная модель, по крайней мере, на качественном уровне объясняет основные особенности технического намагничивания исследованного феррита-граната $Tb_3Fe_5O_{12}$ вблизи его точки магнитной компенсации.

10. Впервые исследована динамика доменных границ в редкоземельном феррите-гранате в низкочастотном знакопеременном магнитном поле в окрестности температуры магнитной компенсации.

11. Выявлен немонотонный характер температурной зависимости величины смещения доменных границ при приближении температуры к точке компенсации: смешение доменных границ имеет острые локальные максимумы справа и слева от температуры магнитной компенсации, положение которых на температурной шкале зависит от частоты переменного поля. Наблюдаемые особенности динамики доменных границ вблизи точки компенсации граната связываются с резонансом собственной частоты колебаний доменных границ с частотой действующего переменного магнитного поля.

12. Развита феноменологическая теория низкочастотного резонанса доменных границ в знакопеременном магнитном поле, согласно которой при переходе температуры через точку магнитной компенсации масса доменных границ растет, а собственная частота их колебаний – падает. Показано, что предложенная теория резонанса доменных границ позволяет непротиворечиво описать экспериментальные результаты, полученные при исследованиях динамики доменных границ в феррите-гранате $Tb_3Fe_5O_{12}$, а также температурной зависимости его начальной магнитооптической восприимчивости и формы петель магнитного гистерезиса эффекта Фарадея.

SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF THE SCIENTIFIC DEGREES DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 AT INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

BUKHARA ENGINEERING-TECHNOLOGICAL INSTITUTE

SHARIPOV MIRZO ZOKIROVICH

DOMAIN STRUCTURE AND MAGNETOOPTIC PROPERTIES OF RARE-EARTH FERRITES - GARNETS IN THE REGION OF SPIN-REORIENTATION PHASE TRANSITIONS

01.04.09 – Physics of magnet phenomena

**ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION (DSc)
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

TASHKENT – 2018

The subject of doctoral dissertation is registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2018.2.DSc/FM68.

Dissertation has been prepared at the Bukhara Engineering-Technological Institute.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) on the website (www.iplt.uz) and the «Ziyonet» information and educational portal (www.ziyonet.uz).

Scientific consultant:	**Djuraev Davron Raxmonovich** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Official opponents:	**Mukimov Komil Mukimovich** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician
	Azamatov Zakirzhan Tahirovich Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
	Ibragimova Elvira Memetovna Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Leading organization:	**Samarkand State University**

Dissertation defense will be held on «____» _____2018 at _____ at the meeting of Scientific Council number DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 at Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (Address: Do'rmon yo'li str., 33, Tashkent, 100125, Uzbekistan, Tel./Fax.: (+998-71) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz, Meeting Room of Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies).

Dissertation is possible to review in Information Resource Centre at Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (is registered №____) (Address: Do'rmon yo'li str., 33, Tashkent, 100125, Uzbekistan, Tel.: (+998-71) 262-32-54.

Abstract of dissertation sent out on «____» _____2018.

(Mailing report № _____on «____» _____2018).

Kh.B. Ashurov
Chairman of scientific council on award of scientific degrees, doctor of technical sciences, senior researcher

D.T. Usmanov
Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, candidate of physical and mathematical sciences

S.A. Bakhramov
Chairman of scientific seminar under scientific council on award of scientific degrees, doctor of physical and mathematical sciences, professor, academic

INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

The aim of the research work the establishment of regularities in the behavior of the domain structure of REFG under magnetic orientational phase transitions, as well as the relationship between these changes in the DS and changes in such practically important magnetic characteristics of the material as mobility of domain walls, magnetic susceptibility, coercive force, and the like.

The objects of the research work are single crystals of rare-earth garnet ferrites, nominally pure garnet ferrites $Tb_3Fe_5O_{12}$, $Dy_3Fe_5O_{12}$ and $Ho_3Fe_5O_{12}$, and also mixed yttrium-terbium $Tb_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$ and yttrium-holmium $Ho_{0.6}Y_{2.4}Fe_5O_{12}$ ferrites - garnets in the form of plane-parallel plates of thickness ~ 100 μm, the developed surfaces of which were oriented parallel to the crystallographic plane (111) or (110).

Scientific novelty of the research work is as follows:

For the first time, direct visual observations of the evolution of the DS of the garnet ferrite $Tb_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$ during the spontaneous reorientation of the direction of the easy magnetization axis were made and it was shown that near the temperature of the investigated phase transition the magnetooptic susceptibility of the crystal has a narrow sharp maximum and the coercive force decreases;

A model of restructuring of the DS of iron garnet $Tb_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ temperature in the region of spontaneous reorientation of the easy axis, which allows to describe the consistent (qualitatively) the totality of the experimental results;

For the first time, experimental studies of the magnetic orientational phase transition induced by biaxial mechanical stresses in a cubic ferrimagnet were performed;

The phenomenological theory of the orientational phase transition induced by mechanical stresses in rare-earth ferrite garnets is developed;

For the first time, experimental studies of the DS of REFG in the temperature range including the temperature of magnetic compensation have shown that, contrary to some existing theories, at H = 0, when the temperature passes through the magnetic compensation point, the DS in the crystal does not disappear;

It is established that near the point of magnetic compensation the domain structure has a significant effect on the process of technical magnetization of the garnet $Tb_3Fe_5O_{12}$, and a model of the process of technical magnetization of a ferrimagne-tic crystal in the temperature range including the temperature of magnetic compen-sation is proposed;

For the first time, the dynamics of domain walls in REFG in a low-frequency alternating magnetic field near the temperature of magnetic compensation is studied;

The phenomenological theory of low-frequency resonance of domain walls in REFG in an alternating magnetic field is developed.

Implementation of the research results. On the basis of the results of domain structure and magneto-optical properties of REFG in the region of spin-reorientation phase transitions:

the magnetic-phase diagram of terbium-ferrite garnet near the magnetic compensation point was used in the study of magnetic and structural phase transitions in complex magnetic systems in the implementation of the scientific project No. AAAA-A17-117021310366-5 "Phase transitions, magnetotransport, magnetocaloric and magnetoelectric phenomena in strongly correlated electronic systems "(reference of the institute of physics named after Kh.I. Amirkhanov of the Russian Academy of sciences of 16 may 2018, №17241/57). The use of scientific results made it possible to describe the magnetic state of rare-earth ferrite garnets near the point of magnetic compensation;

the temperature dependence of the Faraday effect in the vicinity of the critical temperature, and also the developed phenomenological theory is used in the study of magnetic and structural transitions conducted within the framework of the project РНФ 14-22-00279 "Fundamental research in the field of magnetism, phase transformations, magnetoelectronics and microsystem engineering" (reference V.A. Kotel'nikov institute of radio engineering and electronics of the Russian Academy of sciences of 4 april 2018, №11210-2173-220). The use of scientific results made it possible to study the spin-reorientation phase transition in magnets;

the developed model of the reconstruction of the domain structure of the garnet ferrite $Tb_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$ in the temperature region of the spontaneous spin reorientation was used in carrying out research in the laboratory of superconductivity and engineering production for studying the strained states of structural elements (reference Ruzaev institute of mechanical engineering of 10 april 2018, №20-01-722, Russia). The use of scientific results made it possible to analyze the stressed states of structural elements;

the obtained model of the process of technical magnetization of a ferrimagnetic crystal in the temperature range including the temperature of magnetic compensation was used in the implementation of the fundamental grant Ф2-ФА-0-83921 / Ф2-ФА-Ф0383 "Strongly correlated interactions in supercon-ductors and magnetic materials and their critical parameters» (2012-2016) for the study of critical parameters of magnetic materials. (reference Ministry of Higher and secondary special education of 11 april 2018, №89-03-1371). The use of scientific results made it possible to calculate highly correlational interactions in superconductors;

studies of the magnetic orientational phase transition induced by biaxial mechanical stresses in a cubic ferrimagnet were used in the implementation of the fundamental grant ОТ-Ф2-64 "Fluctuation and parametric phenomena in condensed and nano-dimensional systems" (2017-2020) to obtain the expression for the free energy of macroscopic systems. (reference Ministry of Higher and secondary special education of 11 april 2018, №89-03-1371). The use of scientific results has made it possible to apply the development of various devices and devices of magnetic microelectronics, whose operation is based on changing the domain configuration of magnetic structures.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of quoted literature. The text of the thesis is set out on 200 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Шарипов М.З, Соколов Б.Ю. Магнитооптические свойства редкоземельных феррит гранатов. // Монография, - Saarbrucken, Германия, Lambert Academic Publishing, 2014, - С.129.

2. Sharipov M.Z., Dzhuraev D.R., Sokolov B.Yu., Kurbanov M. Modulated magnetic structure of on inhomogeneously stressed single crystal $FeBO_3$ // Ukrainian Journal of Physics. Kiev, 2010, Vol. 55. № 6. - P. 706-711. (№ 40, Research Gate; IF = 0.32)

3. Шарипов М.З. Неколлинеарная магнитная фаза неоднородно напряжённого монокристалла $FeBO_3$ // Узбекский физический журнал. Ташкент, 2011, Т. 13. №2. - С. 97-103. (01.00.00; № 5)

4. Niyazov L.N., Sokolov B.Yu., Sharipov M.Z. Specific features of spontaneous reorientation of the magnetic moment a single-crystal thin plate of the iron garnet $Tb_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$ // Physics of the Solid State. New York (USA), 2012, Vol. 54. Issue 9. - P. 1806-1812. (№ 11. Springer, IF = 0.925)

5. Sokolov B.Yu., Talabov M.D., Sharipov M.Z. Domain structure of a thin single – crystal plate of terbium iron garnet near the magnetic compensation point // Physics of the Solid State. New York (USA), 2013, Vol. 55. Issue 2. - P. 314-320. (№ 11. Springer, IF = 0.925)

6. Sokolov B.Yu., Sharipov M.Z. Low – frequency resonance of domain walls in the iron garnet $Tb_3Fe_5O_{12}$ near the magnetic compensation point // Journal of Experimental and Theoretical Physics. New York (USA), 2013, Vol. 116. Issue 5. - P. 775-779. (№ 11. Springer, IF = 1.255)

7. Sokolov B.Yu., Sharipov M.Z. Technical magnetization of $Tb_3Fe_5O_{12}$ garnet ferrite near the magnetic compensation point // Technical Physics. New York (USA), 2013, Vol. 58. Issue 9. - P. 1273-1279. (№ 11. Springer, IF = 0.707)

8. Sokolov B.Yu., Sharipov M.Z. The influence of domain structure on the Faraday effect in terbium garnet ferrite in the vicinity of the magnetic – compensation temperature // Russian Physics Journal. New York (USA), 2013, Vol. 56. Issue 7. -P. 845-851. (№ 11. Springer, IF = 0.555)

9. Sokolov B.Yu., Sharipov M.Z. Magneto – optical properties of the iron garnet $Tb_3Fe_5O_{12}$ near the magnetic compensation temperature // Physics of the Solid State. New York (USA), 2014, Vol. 56. Issue 5. -P. 975-979. (№ 11. Springer, IF = 0.925)

10. Sokolov B.Yu., Sharipov M.Z. Influence of the biaxial mechanical stress on the domain structure of holmium yttrium garnet ferrite // Russian Physics Journal. New York (USA), 2014, Vol. 57. Issue 8. -P. 1001-1007. (№ 11. Springer, IF = 0.555)

11. Шарипов М.З. Магнитооптические исследование доменной структуры тербиевого феррита-граната $Tb_3Fe_5O_{12}$ в окрестности температуры

магнитной компенсации // Узбекский физический журнал. Ташкент, 2015, Т.17. №3. – С. 178-186. (01.00.00; № 5)

12. Zhumaev M.R., Sharipov M.Z. Resonant enhancement of the Faraday effect in a dielectric multilayer nanostructures // Bulletin of Chelyabinsk State Universi-ty. (Russia), 2015, № 22 (377). Physics, Issue 21. P. 83-88. (Research Gate; IF = 0.112)

13. Zhumaev M.R., Sharipov M.Z. Resonant dissipative model of the Faraday effect in a dielectric multilayer nanostructures // Eurasian Physical Technical Journal. Karaganda (Kazakhstan), 2016, Vol.13, № 2(26), -P. 30 – 38.

14. Zhumaev M.R., Sharipov M.Z. Mirzhonova N.N. Critical number of soliton in the Bose-Einstein condensate // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. New York (USA), 2017, Vol. 11. № 3, -P. 570-574. (№ 11. Springer, IF = 0.359)

15. Sharipov M.Z. The temperature dependence of the Faraday Effect in terbium garnet ferrite is investigated near its magnetic-compensation temperature // Eurasian Physical Technical Journal. Karaganda (Kazakhstan), 2017, Vol.14, № 1(27), -P. 34-40.

16. Джураев Д.Р., Шарипов М.З., Хайитов Д.Э. Магнитооптические свойства феррита-граната $Tb_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$ вблизи температуры спин-переориентационного фазового перехода // Научный вестник Бухарского Государственного университета. Бухара, 2018, № 2(70). –С. 2-6. (01.00.00; № 3)

17. Zhumaev M.R., Sharipov M.Z., Mirzhonova N.N. The averaged lagrangian of solitons of Bose-Einstein condensation // Eurasian Physical Technical Journal. Karaganda (Kazakhstan), 2018, Vol.15, № 1(29), - P. 6-9.

II бўлим (II часть, part II)

18. Шарипов М.З., Джураев Д.Р., Соколов Б.Ю. Ориентационный фазовый переход в неоднородно напряжённом монокристалле бората железа // Электронный журнал - Фазовые переходы, упорядоченное состояния и новые материалы. Ростов на Дону (Россия), 2011, № 5. -С. 1-5.

19. Шарипов М.З., Жумаев М.Р., Хайитов Д.Э. Эффект Керра в дисперсион-ных магнитных структурах // Электронный журнал - Фазовые переходы, упорядоченное состояния и новые материалы. Ростов на Дону (Россия), 2011, № 8. -С. 1-3.

20. Шарипов М.З., Хайитов Д.Э., Талабов М.Д., Халлоков Ф.К., Каландаров Н., Тиллаев О. Доменная структура монокристалла бората железа $FeBO_3$, подвергнутого радиальным механическим напряжениям // Электронный журнал - Фазовые переходы, упорядоченное состояния и новые материалы. Ростов на Дону (Россия), 2012, № 1. -С. 22-24.

21. Шарипов М.З., Соколов Б.Ю., Хайитов Д.Э., Талабов М., Халлоков Ф.К. Фотомагнитные явления в слабом ферромагнетике бората железа // Электронный журнал - Фазовые переходы, упорядоченное состояния и новые материалы. Ростов на Дону (Россия), 2012, № 1. С. 25-28.

22. Шарипов М.З., Далмурадова Н.Н., Хайитов Д.Э., Олимпур Ф. Изменения доменной структуры монокристалла феррита-граната $Tb_3Fe_5O_{12}$ вблизи точки магнитной компенсации // Электронный журнал - Фазовые переходы, упорядоченное состояния и новые материалы. Ростов на Дону (Россия), 2013, № 6. -С. 8-11.

23. Sharipov M.Z., Sokolov B.Yu., Oshilov Sh.B., Olimpur F.I. Magneto-optical investigation of the domain structure of terbium iron garnet // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Vienna (Austria), 2014, № 1. - P. 129-135. (02.00.00; № 2)

24. Шарипов М.З., Очилов Ш.Б. Оптические и магнитооптические свойства редкоземельных ферритов – гранатов // Научная перспектива. Уфа (Россия), 2015, №2(60). - С. 54-56.

25. Шарипов М.З., Соколов Б.Ю., Хайитов Д.Э. Магнитная структура редкоземельных ферритов-гранатов // Приволжский научный вестник. Ижевск (Россия), 2015, № 4-1(44). - С. 7-10.

26. Шарипов М.З., Соколов Б.Ю., Хайитов Д.Э. Доменная структура феррита – граната вблизи точки магнитной компенсации // Развития науки и технологий. Бухара, 2015, № 3. – С. 75-80. (05.00.00; № 24)

27. Жумаев М.Р., Шарипов М.З. Спектральные свойства магнитооптических явлений в немагнитных диэлектрических наноструктурах // Развития науки и технологий. Бухара, 2016, № 3. - С. 134-137. (05.00.00; № 24)

28. Шарипов М.З. Мультиферроики как будущее спинтроники // «Ишлаб чиқаришни юқори технологиялар асосида модернизациялаш-таълим тизимининг устивор вазифаси» мавзусида институт илмий амалий анжумани. Бухоро, 2012, -С.126-129.

29. Шарипов М.З., Соколов Б.Ю., Талабов М.Д., Пардаев У.Я. Изменения доменной структуры монокристаллической пластинки феррита-граната, в температурной области фазового перехода // IV-Международная конференция «Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред». Самарканд. 2013, - С. 152.

30. Шарипов М.З., Соколов Б.Ю., Далмурадова Н.Н., Хайитов Д.Э. Динамика колебательного движения доменных границ в феррите-гранате $Tb_3Fe_5O_{12}$ // Международная конференция по физике конденсированного состояния. Душанбе (Таджикистан), 2013, - С. 167-170.

31. Шарипов М.З., Соколов Б.Ю., Далмурадова Н.Н., Хайитов Д.Э. Состояние доменной структуры тонкой монокристаллической пластинки $Tb_3Fe_5O_{12}$ вблизи температурной магнитной компенсации // XIV Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества. Екатеринбург (Россия), 2013, - С. 71.

32. Шарипов М.З. Модель изменения доменной структуры кристалла $Tb_3Fe_5O_{12}$ при переходе температуры точки магнитной компенсации // Республиканская научно-практическая конференция «Современные проблемы моделирование механических и технологических процессов основанных на высоких технологиях». Бухара, 2013, - С. 267-169.

33. Шарипов М.З., Соколов Б.Ю. Процесс технического намагничивания монокристалла феррита-граната в некоторых температурных областях // «Физика фанининг ривожида истеъдодли ёшларнинг ўрни» Республика илмий - амалий конференцияси (РИАК-VII). Ташкент, 2014, - С. 139-142.

34. Шарипов М.З., Соколов Б.Ю. Магнитное состояние редкоземельных феррит - гранатов вблизи температуры магнитной компенсации // VI Байкальская Международная конференции «Магнитные материалы. Новые технологии». Иркутск (Россия), 2014, - С. 138-139.

35. Шарипов М.З., Соколов Б.Ю. Температурная зависимость начальной магнитооптической восприимчивости феррита-граната $Tb_3Fe_5O_{12}$ в окрестности температуры магнитной компенсации // 5-ая всероссийская конференция с международным участием «Наноматериалы и технологии». Улан-Удэ (Россия), 2014, - С. 156-159.

36. Шарипов М.З., Соколов Б.Ю. Влияние радиально направленных механических напряжений на изменения доменной структуры монокристалла бората железа // XIII Международная конференция «Дислокационная структура и механические свойства металлов и сплавов (ДСМСМС-2014)». Екатеринбург (Россия), 2014, - С.185-188.

37. Шарипов М.З. Оптические и магнитооптические свойства редкоземельных ферритов-гранатов // «Техника ва технологияларни ривожланиши муаммолари ва истиқболий йўналишлари» мавзусида профессор-ўқитувчилар, катта илмий ходим-изланувчилар ва магистрлар илмий амалий анжумани материаллари. Бухара, 2014, - С. 287-290.

38. Шарипов М.З. Структура и основные свойства ферритов // «Замонавий ишлаб чиқаришнинг энергия таъминоти илмий муаммолари» Республика илмий-амалий анжумани. Бухара, 2014, -С. 184-185.

39. Шарипов М.З., Соколов Б.Ю. Полевые зависимости эффекта Фарадея в феррите-гранате $Tb_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O$ вблизи температуры спиновой переориентации // VIII Международная конференция «Фазовые превращения и прочность кристаллов». Черноголовка (Россия), 2014, - С. 168.

40. Шарипов М.З., Файзиев Ш.Ш., Соколов Б.Ю. Влияние света на модуляцию магнитного порядка кристалла $FeBO_3$:Mg // II Всероссийская научная конференция «Актуальные проблемы нано – и микроэлектроники». Уфа (Россия), 2014, - С.181.

41. Шарипов М.З., Файзиев Ш.Ш., Далмурадова Н.Н., Халлоков Ф.К., Олимпур Ф.И. Особенности кристаллической и магнитной структуры бората железа $FeBO_3$ // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Актуальные проблемы химической технологии» Бухара, 2014, -С. 22-25.

42. Шарипов М.З., Соколов Б.Ю. Малогабаритный проточный оптический криостат для исследований влияния температуры на магнитное состояние кристаллов // «Физика фанининг ривожида истеъдодли ёшларнинг ўрни» Республика илмий – амалий конференцияси мақолалари тўплами (ИАК-VIII). Ташкент, 2015. - С. 71-74.

43. Шарипов М.З. Динамика доменных границ редкоземельных феррит-гранатов // «Замонавий ишлаб чиқаришнинг муҳандислик ва технологик илмий амалий муаммолари» мавзусида институт илмий амалий анжуман материаллари. Бухоро, 2015, -С. 289-291.

44. Шарипов М.З., Файзиев Ш.Ш., Халлоков Ф.К. Доменная структура и процесс намагничивания бората железа // «Замонавий физика ва астрофизиканинг долзарб муаммолари» III – Республика илмий амалий анжумани. Карши, 2015, - С. 111-113.

45. Жумаев М.Р., Шарипов М.З., Хайитов Д.Э. Условия усиления магнитооптического эффекта Керра в многослойных поглощающих магнитных наносистемах // «Замонавий физика ва астрофизиканинг долзарб муаммолари» III-Республика илмий амалий анжумани. Карши, 2015, - С. 113-115.

46. Жумаев М.Р., Шарипов М.З. Резонансное усиление эффекта Фарадея в диэлектрических многослойных наноструктурах // Международная конференция «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах». Челябинск (Россия), 2015, - С. 139.

47. Шарипов М.З., Соколов Б.Ю. Фазовая зависимость редкоземельных феррит – гранатов вблизи температуры магнитной компенсации // XI – международный семинар «Магнитные фазовые переходы». Махачкала (Россия), 2015, - С. 120-123.

48. Жумаев М.Р., Шарипов М.З. Гигантское усиление магнитооптического эффекта Фарадея при частотной зависимости показателя преломления и коэффициента поглощения // XI – международный семинар «Магнитные фазовые переходы». Махачкала (Россия), 2015, - С. 128-131.

49. Шарипов М.З., Соколов Б.Ю. Динамика доменных границ в феррите – гранате вблизи температуры магнитной компенсации // L Школа Петербургского института ядерной физики по физике конденсированного состояния. Санкт-Петербург (Россия), 2016, - С. 203.

50. Жумаев М.Р., Шарипов М.З., Носирова Н.К. Классификация экстремальных точек потенциала ориентационного взаимодействия // Тезисы докладов Республиканской научной конференции «Современные проблемы физики конденсированного состояния – «СПФКС-2016»». Бухара, 2016, -С. 11-12.

51. Жумаев М.Р., Шарипов М.З. Спектральные свойства коэффициентов прохождения и отражения многослойных немагнитных диэлектрических наноструктур // Тезисы докладов Республиканской научной конференции «Современные проблемы физики конденсированного состояния – «СПФКС-2016»». Бухара, 2016, - С. 40-41.

52. Шарипов М.З., Соколов Б.Ю. Магнитооптические свойства и процесс технического намагничивания феррита граната вблизи точки магнитной компенсации // Республиканская научная конференция «Современные проблемы физики конденсированного состояния – «СПФКС-2016»». Бухара, 2016, -С. 45-47.

53. Жумаев М.Р., Шарипов М.З. Динамика нелинейных колебаний доменных границ феррит - гранатов // V-Международная конференция

«Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред». Самарканд, 2016, - С. 48.

54. Шарипов М.З. Доменная структура редкоземельного феррита – граната в области спин – переориентационных фазовых переходов // V-Международная конференция «Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред». Самарканд, 2016, - С. 161-162.

55. Zhumaev M.R., Sharipov M.Z. Resonant amplification the Faraday effect in multi-dimensional nano structures // New Trends of Development Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects. Tashkent, 2016, -P. 345-347.

56. Шарипов М.З., Соколов Б.Ю. Магнитооптические исследования доменной структуры монокристалла гольмий иттриевого феррита-граната под действием механических напряжений // XVII Всероссийская школа – семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-17). Екатеринбург (Россия), 2016, - С. 81.

57. Жумаев М.Р., Шарипов М.З. Спектральные особенности эффекта Фарадея в немагнитных диэлектрических наноструктурах // XVII Всероссийская школа – семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-17). Екатеринбург (Россия), 2016, - С. 89.

58. Жумаев М.Р., Шарипов М.З. Влияния токовых флуктуаций на излучательные характеристики высокотемпературных сверхпроводни-ковых джозефсоновских линий передачи // Сборник тезисов LI Школы ПИЯФ по физике конденсированного состояния (ФКС-2017). Гатчина, Санкт-Петербург (Россия), 2017, - С. 189.

59. Шарипов М.З. Доменная структура редкоземельных феррит – гранатов // «Фан ва таълим ютуқлари инсон манфаатлари йўлида» илмий амалий анжуман материаллари. Бухоро, 2017, -С. 388-390.

60. Шарипов М.З., Жумаев М.Р. Магнитооптические свойства и фазовые переходы в ферритах гранатах с учетом ориентационных взаимодействий // «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари» VII-илмий назарий анжуман материаллари. Термиз, 2017, - С.118-119.

61. Шарипов М.З., Хайитов Д.Э., Файзиев Ш.Ш., Касимова Г.К. Магнитооптическая воспримчивость и петля магнитного гистеризиса эффекта Фарадея в редкоземельном феррите – гранате // Материалы Республиканской конференции «Проблемы физики и роль одаренной молодежи в её развитии». Ташкент, 2017, - С. 48-50.

62. Шарипов М.З. Доменная структура монокристалла феррита-граната вблизи точки магнитной компенсации // Сборник трудов XII международ-ного семинара «Магнитные фазовые переходы». Махачкала (Россия), 2017, - С. 99-101.

63. Жумаев М.Р., Шарипов М.З. Изменение равновесной ориентации в магнетиках при ориентационных взаимодействиях // Сборник трудов международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах». Махачкала (Россия), 2017, - С. 381-382.

64. Шарипов М.З., Жумаев М.Р., Хайитов Д.Э. Ориентационные фазовые переходы I-ого рода в ферромагнетиках // Сборник трудов международ-ной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития инновационного сотрудничества в научных исследованиях и системе подготовки кадров». Бухара, 2017, – С. 78-80.

Автореферат «Тил ва адабиёт таълими» журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек ва рус тилларидаги матнлари ўзаро мувофиқлаштирилди. (04.05.2018 йил)

Босишга рухсат этилди: 30.08.2018 йил
Бичими 60x45 $^{1}/_{8}$, «Times New Roman»
гарнитурада рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 3,9. Адади: 100. Буюртма: № 281.

Ўзбекистон Республикаси ИИВ Академияси,
100197, Тошкент, Интизор кўчаси, 68.

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.