

САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
PhD.29.08.2017. FM.02.04 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

БУХОРО ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

НИЯЗОВ ЛАЗИЗ НУРХОНОВИЧ

НОДИР ЕР ЭЛЕМЕНТЛИ ФЕРРИТ-ГРАНАТЛАРДА МАГНИТЛИ
ФАЗАВИЙ ЎТИШЛАРНИНГ ХУСУСИЯТЛАРИ

01.04.09 – Магнит ҳодисалари физикаси

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Самарқанд – 2017

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации
доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) on physical-
mathematical sciences**

Ниязов Лазиз Нурхонович

Нодир ер элементли феррит-гранатларда магнитли
фазавий ўтишларнинг хусусиятлари3

Ниязов Лазиз Нурхонович

Особенности магнитных фазовых переходов
в редкоземельных ферритах-гранатах.....21

Niyazov Laziz Nurkhonovich

Features of magnetic phase transitions in rear earth
iron-garnets.....39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works.....43

**САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
PhD.29.08.2017. FM.02.04 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

БУХОРО ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

НИЯЗОВ ЛАЗИЗ НУРХОНОВИЧ

**НОДИР ЕР ЭЛЕМЕНТЛИ ФЕРРИТ-ГРАНАТЛАРДА МАГНИТЛИ
ФАЗАВИЙ ЎТИШЛАРНИНГ ХУСУСИЯТЛАРИ**

01.04.09 – Магнит ҳодисалари физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Самарқанд – 2017

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.2.PhD/FM74. рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Бухоро давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.samdu.uz) ва «Ziynet» ахборот таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар: **Джураев Даврон Рахмонович**
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар: **Тураев Эргаш Юлдашевич**
физика-математика фанлари доктори, профессор

Ўринов Худоёр Омонович
физика-математика фанлари номзоди, доцент

Етакчи ташкилот: **Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий Университети**

Диссертация химояси Самарқанд давлат университети ҳузуридаги PhD.29.08.2017.FM02.04 рақамли Илмий кенгашнинг 2017 йил «___» _____ соат ___даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 140104, Самарқанд шаҳри, Университет хиёбони, 15 уй. Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40; e-mail: rektor@samdu.uz Самарқанд давлат университети Физика факультети, 1-қават, 63-хона).

Диссертация билан Самарқанд давлат университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (___рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 140104, Самарқанд шаҳри, Университет хиёбони, 15 уй. Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40.

Диссертация автореферати 2017 йил «___» _____да тарқатилди.
(2017 йил «___» _____даги _____рақамли реестр баённомаси).

М.Х.Ашуров
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., академик

Р.М.Ражабов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.н., доцент

Д.И.Семенов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д.

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги кунда жаҳон миқёсида жадал ривожланаётган магнетизм физикаси соҳасида истиқболли йўналишлардан бири компьютер технологиялари, телекоммуникация системалари ва робототехниканинг хотира аппаратларига маълумот ёзиш ёки ўчириш учун мўлжалланган нодир ер элементли феррит-гранатларда домен структураларни бошқаришга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Бу борада домен структураларга таъсир кўрсатиш мақсадида уларда содир бўлаётган физикавий жараёнларни ва магнит характеристикаларининг шаклланиш механизмларини аниқлаш, айниқса нодир ер элементли феррит-гранатлар учун муҳим вазифалардан бири бўлиб ҳисобланади.

Ҳозирги кунда дунёда ферро- ва ферромагнетикларда ташқи таъсир ёрдамида домен структураларини ўзгартириш ва уларни бошқаришга эътибор қаратилмоқда. Бу борада, мақсадли илмий тадқиқотларни жумладан, қуйидаги йўналишлардаги илмий изланишларни амалга ошириш муҳим вазифалардан ҳисобланади: ориентацияли фазавий ўтишлар натижасида вужудга келадиган домен структураларнинг ўзгаришини аниқлаш; домен структура ўзгаришининг магнитооптик характеристикаларга таъсирини аниқлаш; кристаллнинг спонтан магнитланганлик вектори йўналишини ва домен стуктурани ўзгартириш.

Мустақиллик йилларида республикамизда илм фан соҳасида устивор ривожланишга, жумладан магнетикларни қўллаш ҳамда уларнинг магнитооптик ва домен структураларини тадқиқ қилишга катта эътибор қаратилди. Бу йўналишда ферромагнетикларнинг магнит хоссалари, магнитооптик хусусиятлари ҳамда домен структураларини ўрганиш ва турли микроэлектроника ускуналарида қўллаш бўйича сезиларли натижалар олинди. Бу борада «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармонини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратиш, шу жиҳатдан яримўтказгичли асбобларда кечаётган физик жараёнларни амалиётга татбиқ этиш натижасида янги технологияларни жорий қилиш орқали мкроэлектроника саноати қурилмаларининг самарадорлигини ошириш муҳим аҳамиятга эга.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракат-лар 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 мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг II. «Энергетика, энерго- ва ресурстежамкорлик»нинг устувор йўналишига доир бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Бугунги кунда нодир ер элементли феррит-гранатларнинг магнитооптик хоссалари ва домен структурасининг ўзгаришини тадқиқ этиш магнит ҳодисалар физикасининг долзарб муаммоси ҳисобланади. Монокристалларни ўрганишда жуда катта муваффақиятларга эришилган бўлиб, ушбу соҳа назарий ва экспериментал жиҳатдан таниқли физик олимлар – Вонсовкий, Белов, Гинзбург, Звездин (Россия) ва Тикадзуми (Япония) томонидан ўрганилган. Бугунги кунда умумий ҳолатлар билан бирга ориентацияли магнитли фазавий ўтишлар, уларни юзага келтирган физикавий табиатга қараб турли специфик хусусиятга эгаллиги аниқланган.

Таъкидлаш жоизки, бу соҳанинг ривожланишига Ўзбекистонлик олимлар У.В.Валиев, Б.Ю.Соколовлар ҳам маълум ҳисса қўшган. Охирги йиллардаги экспериментал ва назарий тадқиқотлар шуни кўрсатадики, ташқи таъсир остидаги магнитооптик хоссалар ва домен структуранинг ўзгариши билан боғлиқ тадқиқотлар систематик равишда олиб борилмаган. Феррит-гранатларда ориентацияли фазавий ўтиш ҳамда ориентацияли фазавий ўтишнинг ташқи магнит майдон ёки механик кучланишлар таъсирида вужудга келишига оид тадқиқотлар систематик равишда амалга оширилмаган.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Бухоро давлат университети илмий ишлари режасига биноан ФА-Ф2-Ф104+Ф105 «Исследование оптических и структурных свойств сверхпроводников и магнитных материалов» (2007-2011 йй.); Ф2-ФА-Ф0383 «Сильно-коррелированные взаимодействия в сверхпроводниках и магнитных материалах и расчёт их критических параметров» (2012-2016 йй.) илмий лойиҳалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади магнит тартибланган кристалларда ташқи таъсир остидаги спонтан ва индуцирланган фазавий айланишлар ҳақида янги экспериментал натижалар олиш, ҳамда улар асосида ориентацияли магнитли фазавий ўтишларнинг мавжуд термодинамик назариясини ривожлантиришдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

тадқиқ этилган магнит кристалларнинг доменли тузилмасини визуал кузатишни амалга ошириш;

$Tb_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$ феррит-гранатида спонтан ориентацияли фазавий ўтишларни тадқиқ этиш;

$Ho_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$ феррит-гранатида икки ўқли механик кучланишлар таъсирида келиб чиқадиган ориентацияли фазавий ўтишларни тадқиқ этиш;

магнит кристалларнинг ориентацияли фазавий ўтишлар натижасида вужудга келадиган домен структураларнинг ўзгаришини аниқлаш;

ориентацияли фазавий ўтишларнинг кристалл асосий магнит характеристикаларига таъсирини тадқиқ этиш;

кубсимон кристалларда спонтан ориентацияли фазавий ўтишлар термодинамик назарияси қоидаларини ривожлантириш;

термодинамик назария доирасида кубсимон кристалда икки ўқли механик кучланиш таъсирида келиб чиқадиган ориентацияли фазавий ўтиш моделини таклиф этиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида қотишмада эритмадан спонтан кристаллаш усули билан ўстирилган $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$, $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ феррит-гранатлар монокристаллари олинган.

Тадқиқотнинг предмети ҳарорат, ташқи магнит майдон кучланиши ва механик кучланиш катталиклари натижасида кристалларда вужудга келадиган ориентацион фазавий ўтиш жараёнларидан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Диссертацияда ориентацион фазавий ўтишларни тадқиқ этишда $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$, $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ кристалларида асосий усул сифатида домен структураларни магнитооптик визуализацияси ишлатилди, ҳамда домен структураларнинг механик кучланишлар, ташқи магнит майдон ва ҳарорат таъсири, Фарадей ва Коттон-Мутон эффектларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

биринчи марта $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$ феррит-гранатида енгил магнитланиш ўқи йўналиши спонтан қайта ориентациялангандаги домен структура эволюцияси визуал кузатилган, бунда тадқиқ этилган фазавий ўтиш ҳарорати яқинида магнитооптик сингдирувчанлиги тор, кескин максимумга эга бўлиб, коэрцитив куч эса пасайиши аниқланган;

ўтказилган барча экспериментлар натижаларини таҳлил қилиш асосида енгил магнитланиш ўқи бўлган спонтан қайта ориентацияланиши ҳарорати соҳасида $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$ феррит-гранати домен структурасининг қайта тизимланиш модели таклиф этилган;

илк бор ферримагнетикда икки ўқли механик кучланиш таъсирида вужудга келадиган магнитли ориентацион фазавий ўтишни ўрганиш бўйича экспериментал тадқиқотлари олиб борилган;

нодир ер элементли феррит-гранатларида механик кучланиш ёрдамида ориентацион фазавий ўтишларнинг феноменологик назарияси ривожлантирилган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси шундан иборатки, экспериментлар асосида спонтан ориентацион фазавий ўтишда кубсимон ферримагнетикнинг домен структураси ўзгариши моделлари ва икки ўқли механик кучланиш таъсирида вужудга келадиган магнитли ориентацияли фазавий ўтишнинг термодинамик назарияси таклиф этилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги тадқиқотда қўлланилган кристалларни асосий магнит характеристикалари ва магнит структурасини тадқиқот қилишда замонавий магнитооптик усулларнинг комплекси

қўлланилганлиги; турли усуллар ёрдамида олинган экспериментал натижаларнинг ўзаро ҳамда назарий ҳисоб-китоблар натижалари билан мувофиқ келиши; олинган натижаларнинг умумфизикавий тасаввурлар ва мавжуд адабиётларда келтирилган маълумотларга зид келмаслиги билан тасдиқланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундаки, спин қайта ориентацияланишда магнит тартибланган кристалларда домен структураларнинг қайта тизимланиши тадқиқот натижалари магнитли ориентацияли фазавий ўтишлар назариясига аниқликлар киритилиши ва ривожлантириши; замонавий магнит доменлар физикаси соҳасидаги тасаввурларини кенгайтиради.

Тадқиқотнинг амалий аҳамияти шундаки, тадқиқотлар натижасида спин-қайта ориентацияланиш магнит фазавий ўтишида кристаллардаги домен структураларнинг қайта тизимланиш қонуниятлари ҳамда улар билан амалий жиҳатдан боғлиқ муҳим бўлган физикавий хоссалар, яъни, магнитооптик сингдирувчанлик, коэрцитив куч ва бошқа турли магнит микроэлектроника ускуналарида, жумладан, маълумотни термомагнит усулда ёзиш/ўчириш усули қўлланиладиган ускуналарда қўлланилиши мумкинлиги кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Кубсимон ферримагнетикнинг домен структураси спонтан ориентацияли фазавий ўтишдаги ўзгариши ва икки ўқли кучланишлар таъсирида вужудга келадиган ориентацияли фазавий ўтиш бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида:

нодир ер элементли феррит-гранатларнинг магнитооптик хоссалари ва домен структура ўзгариши асосида таклиф этилган модели Р424 рақамли лойиҳани бажаришда спонтан қайта ориентацияланиш йўналишини аниқлашда қўлланилган (Украина Фанлар Академияси Қаттиқ жисмлар физикаси, материалшунослик ва технологиялар институтининг 11-00/03-170-2887 рақамли 2017 йил 27 ноябрдаги маълумотномаси). Илмий натижанинг қўлланилиши $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$ феррит-гранати домен структурасининг ўзгаришини таҳлил этиш имконини берган;

$Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$ феррит-гранатида энгил магнитланиш ўқи қайта ориентацияланиш ҳарорати соҳасида олинган натижалар асосида таклиф этилган модель ўта ўтказувчанлик ва “Машинасозлик ишлаб чиқариши” лабораторияларида конструкцион элементлар кучланиш ҳолатларини ўрганишда қўлланилган (Россия машинасозлик институтининг 2017 йил 26 ноябрдаги маълумотномаси). Илмий натижанинг қўлланилиши конструкцион элементлар кучланиш ҳолатларини кучланиш йўналишига боғлиқлигини аниқлаш имконини берган;

нодир ер элементли феррит-гранатларда ҳарорат таъсирида домен структураларнинг эволюцияси; спонтан ориентацион фазавий ўтишнинг феноменологик назарияси; фазавий ўтишларни амалга ошириш учун магнитлаш жараёнларининг натижалари Ф-2-06 “Нодир ер элементли феррит-гранатларда магнитли ориентацион ўтишлар” (2011-2016) фундаментал

лойихасида турли кристаллографик йўналишлар бўйича магнитлаш жараёнларини тадқиқ этишда қўлланилган (Ўзбекистон Республика Фан ва технологиялар агентлигининг 2017 йил 7 ноябрдаги ФТА – 02-11/1030 - сонли маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш ясси параллел кристалларни турли кристаллографик йўналишлар бўйича магнитлаш имконини берган;

кристалларга қўшўқли механик кучланишлар ҳосил қилиш методикаси; термодинамик назария асосида кубсимон кристалларда механик кучланиш ёрдамида келтириб чиқарилган ориентацион фазавий ўтиш моделидан ЁФ-2-1 “Ориентациявий ўзаро таъсири инобатга олган ҳолда феррит-гранатлардаги фазавий ўтишлар ва магнитооптик хусусиятларни тадқиқ этиш” (2016-2017) фундаментал лойихасида кристалларда механик кучланишларни ҳосил қилишда қўлланилган (Ўзбекистон Республика Фан ва технологиялар агентлигининг 2017 йил 7 ноябрдаги ФТА – 02-11/1030 - сонли маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш механик кучланиш таъсирида фазавий ўтиш моделини ишлаб чиқиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 8 та ҳалқаро ва 6 та республика миқёсидаги илмий–амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 25 та илмий иш чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 8 та мақола нашр этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 124 бетни ташкил этган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, мавзу бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи, муаммонинг ўрганилганлик даражаси келтирилган, тадқиқот мақсади, вазифалари, объекти ва предмети тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг жорий қилиниши, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар берилган.

Диссертациянинг биринчи боби **«Магнит тартибланган кристалларнинг ориентацион фазавий ўтишлари термодинамик назарияси асослари ва магнит характеристикалари»** деб номланиб, ушбу бобда мавжуд адабиётлар шарҳи келтирилган. Ландау фазавий ўтишлар назариясидан асосий маълумотлар келтирилиб, қуйидаги масалалар кўрилган: кристалларнинг магнит тартибланиш турлари, материалларнинг домен структуралари ва асосий магнит характеристикалари. Ушбу маълумотлар бўйича экспериментал ва назарий ишларнинг қисқача таҳлили келтирилган.

Диссертациянинг иккинчи боби **«Экспериментал ускуналар, эксперимент услубиёти ва намуналар»** деб номланиб, ушбу бобда қўлланиладиган намуналар, ускуналар, магнит тартибланган кристалларнинг магнит ва магнитооптик хоссалари, домен структураларни экспериментал тадқиқ қилиш усуллари ва техникаси келтирилган.

Тадқиқотларда аралаш иттрий-тербийли ва иттрий-гольмийли феррит-гранатлар $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$ ва $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ таркибли материаллар ишлатилди. Бу кристалларнинг танланиши бежиз эмас: тоза нодир ер элементли феррит-гранатларга қараганда $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$ ва $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ ларда нисбатан кичик магнит анизатропия билан характерланади, шунинг учун ҳам ушбу кристалларда мос равишда спонтан ориентацион фазавий ўтиш ва механик кучланишлар ёрдамида вужудга келтирилган ориентацион ўтиш тадқиқотлари ўтказилди. Бундан ташқари адабиётларда $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$ феррит-гранатининг анизатропия константасининг ҳароратга боғлиқлиги тўғрисида маълумотлар мавжуд бўлиб, улардан спин қайта ориентациялаш ҳарорати яқинида ушбу кристал магнит ва магнитооптик хоссаларининг ўзгариши тадқиқотлари натижаларини талқин қилишда фойдаланиш мумкин.

Барча тадқиқ этиладиган кристаллар суюқланмада эритмадан спонтан кристаллаш усули билан синтез қилинган бўлиб, $y \sim 6 \times 6 \times 6$ мм³ ўлчамидаги ҳажмли кўп қирра шаклига эга бўлиб, улардан ривожланган юзаси (110) ёки (111) кристаллографик тексликка параллел қилиб қалинлиги $\sim 100 \div 300$ мкм ли яссипараллел пластинкалар кесилган. Тадқиқотларда қўлланиладиган намуналарнинг тексликдаги кўндаланг ўлчамлари $\sim 2 \div 3$ мм ни ташкил этиб, юзаси механик ишлов бериш ва олмос пасталари билан силлиқлаш (бузилган

юза усти қатламни йўқотиш мақсадида) дан сўнг 200 °С да ортофосфат кислота билан ишлов берилиб, қолдиқ кучланишларни йўқотиш учун бир сутка давомида ҳавода 600 °С да куйдирилади.

Экспериментларда намунанинг магнит ҳолати тўғрисида маълумотлар магнитооптик усулда поляризацион микроскоп ёрдамида домен структурани (ДС) визуал кузатиш орқали олинди. Магнитооптик Фарадей эффекти усули ёрдамида намуналарнинг ДС “оқ” ёруғликнинг “ўтиши” кузатиш амалга оширилди. Чунки, кўпгина ҳолларда тадқиқ этилган доменлардаги магнитланганлиги намунанинг текслигида ётганлиги сабабли, ДС ларни кузатиш намунани ёруғлик нурига нисбатан бурилиши орқали (нурнинг тушиш бурчаги $\theta \leq 15^\circ$) амалга оширилди: намунанинг бундай ориентациясида ёруғлик кутбланиш текслиги фарадей айланишининг вужудга келиши, ёруғлик нури йўналишига магнитланганлик вектори проекциясининг пайдо бўлиши билан изоҳланади.

Экспериментал ускунанинг асосини поляризацион микроскоп ташкил этди. Ускунанинг оптик қисми аъъанавий фарадей услубига эга. ДС ва унинг ташқи магнит майдон, механик кучланиш ва ҳарорат ўзгариши таъсирида вужудга келадиган эволюциясини кузатишдан ташқари, диссертация юзасидан қўйилган масалаларни ечиш учун ўрганилаётган кристалларнинг магнитланиш жараёни ва у билан боғлиқ асосий магнит хусусиятлари ўрганилди. Экспериментларда намунани 25 ÷ 95 Гц частота билан қайта магнитлаш жараёнида магнитооптик сигнал гистерезис ҳалқаси $F(H) \propto M(H)$ (F – фарадей айланиш бурчаги, M – магнитланганлик) ва ўзгарувчан магнит майдонда ўлчанадиган магнитооптик сингдирувчанликнинг ҳароратга боғлиқлиги $\partial F/\partial H(T) \propto \partial M/\partial H(T)$ тадқиқ этилди.

Ферро- ва антиферромагнетизм фазовий ориентацион векторларини аниқлаш учун магнитооптик эффектга чизикли боғлиқ бўлган M дан ташқари магнитланганлиги бўйича жуфт бўлган магнитооптик эффект – ёруғликнинг магнит чизикли иккиланган нур синиши тадқиқ этилди. Тадқиқотларда ишлатилган оптик криостат, экспериментларни 80-290 К ҳарорат соҳасида олиб боришга имкон беради.

Диссертациянинг учинчи боби «**Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe₅O₁₂ феррит-гранатида спонтан спин-қайта ориентацион фазавий ўтиш**» деб номланиб, ушбу бобда Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe₅O₁₂ феррит-гранатининг домен структуралари мувозанат ҳолати вужудга келадиган кристаллнинг магнитсизлантирилган ҳолати экспериментал тадқиқоти натижалари келтирилган. Енгил магнитланганлик ўқи йўналишининг спонтан қайта тизимланишдаги Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe₅O₁₂ феррит-гранати домен структурасининг қайта тизимланиши ҳамда магнитооптик сингдирувчанлик ва коэрцитив кучга таъсир этувчи домен структуранинг қайта тизимланиши визуал кузатилиши амалга оширилди.

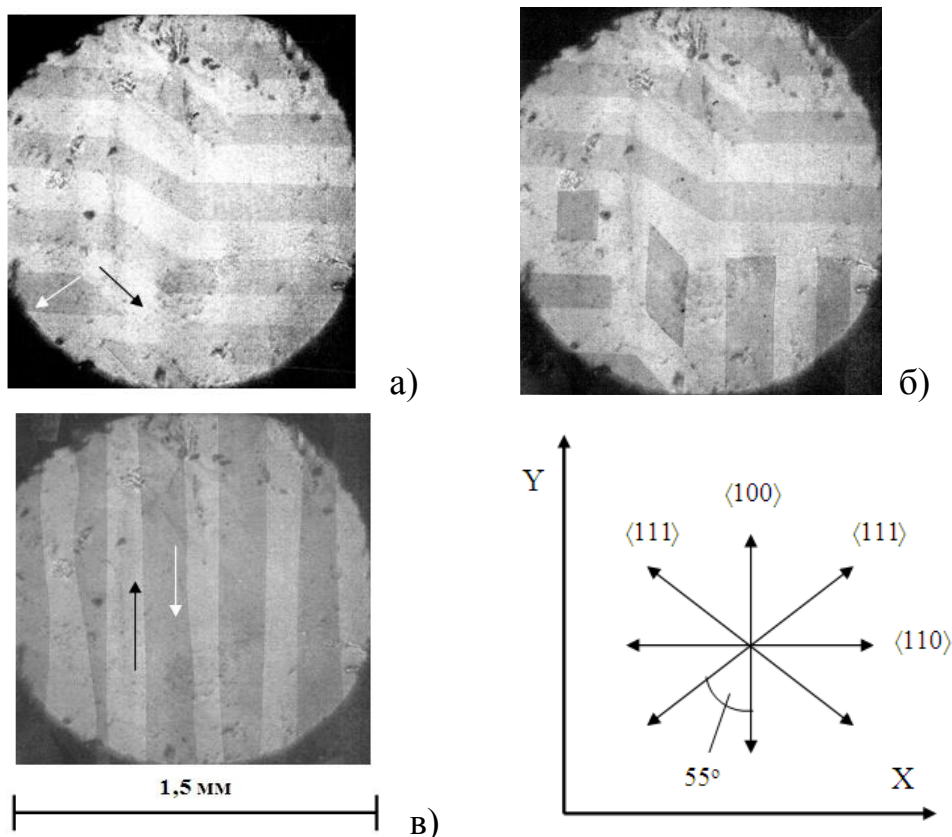
Ориентацион фазавий ўтишлар назариясидан келиб чиқадики, Tb_xY_{3-x}Fe₅O₁₂ гранат системаларида енгил магнитлаш ўқи ориентацияси турли ҳарорат боғлиқликларига эга бўлган кубсимон магнит анизатропияси константалари биринчи K_1 ва иккинчи K_2 катталиклари орасидаги нисбатларидан аниқланади. $K_1 \leq -K_2/3$ (хона ҳароратига яқин соҳалар) да

[111] турдаги ўқга (Φ_{111} магнит фаза) \mathbf{M} ориентация, $K_1 \geq 0$ да эса [100] турдаги ўқга (Φ_{100} магнит фаза) барқарор бўлади. Келтирилган нисбатлардан кўринадик, шундай K_1 ва K_2 константа қийматлари соҳаси мавжудки (маълум бир ҳарорат интервалида) унда Φ_{111} ва Φ_{100} фазалар биргаликда мавжуд бўлади (ушбу нисбатлардаги тенглик белгиси маълум \mathbf{M} ориентацияли фаза барқарорлигини йўқотиш нуқтасига мос келади).

Ҳароратни хона ҳароратидан пасайтирилганда K_1 қийматини ўзгартиради ва

$$9K_1 + K_2 = 0 \quad (1)$$

шароитда [111] енгил ўқ йўналишидан [100] йўналишига сакраш орқали қайта тизимланади. бизни қизиқтирадиган таркиб $Tb_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$ магнит ҳолатини тавсифловчи маълум бўлган $x \approx 0,26$ фазавий диаграммасида (1) шарт бажариладиган ҳарорат $T_c \approx 120$ К ни ташкил этади.



а – 290, б – 129, в – 120 К. Намуна X ва Y ўқлари бўйлаб микроскоп фокал текслигига нисбатан $\approx 15^\circ$ бурчакка бурилган. Стрелкалар қўшни доменларда спонтан магнит момент йўналишини ифодалайди. Иловада: лаборатория системаси координата ўқлари ва намуна текслигида асосий кристаллографик йўналишлар ориентацияси (Z ўқи – кристаллга тушаётган ёруғлик йўналиши) келтирилган

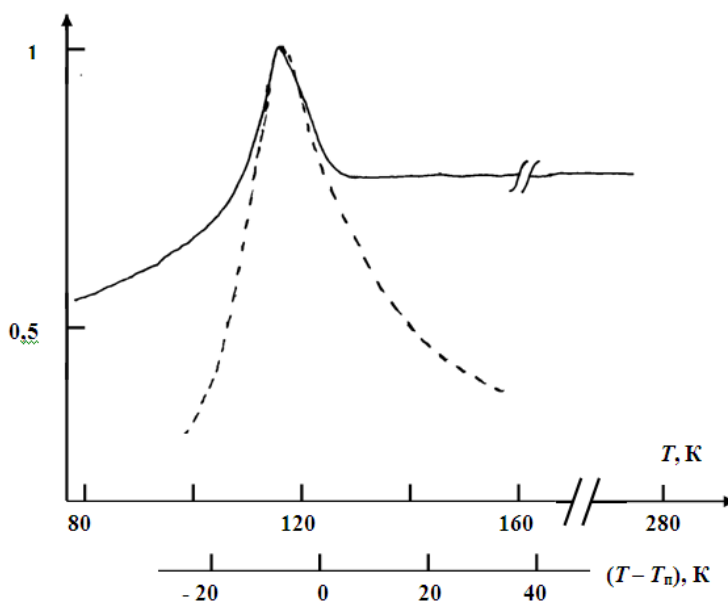
1-расм. Турли ҳароратларда ноль магнит майдонда тадқиқ этилган $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$ феррит-гранат намунанинг олинган домен структураси тасвирлари

Визуал кузатишлар $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$ феррит-гранатида намуналардаги ҳосил бўладиган домен конфигурацияларда кристаллографик ориентациясига боғлиқ равишда \mathbf{M} вектори намуна текслигидаги доменлар ҳамда намуна

текслиги билан маълум бурчак ҳосил қилувчи \mathbf{M} векторлари мавжуд бўлиб, олинган экспериментал натижаларни изоҳлашни анча қийинлаштирди. Шу билан бирга (110) текслиги бўйича ориентацияланган намуналарда механик кучланишлар бўлмаган назарий тасавурларга мос келадиган ([111] ва [100] ўқлари намуна текслигида жойлашган) “коттон” типидagi ДС ҳосил бўлади. Шу сабабли тадқиқотлар ДС га таъсир этувчи енгил магнитланиш ўқи қайта тизимланиши ва $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$ феррит-гранатнинг асосий магнит хусусиятлари ривожланган юзалари (110) кристалл тексликка параллел бўлган намуналарда олиб борилди.

Визуал кузатишлардан шу аниқландики, паст ҳароратлар соҳасида тадқиқот қилинган намуна ДС маълум даражада эволюцияга учрайди. Ҳарорат $T = 290$ К дан $T \approx 132$ К гача пасайтирилганда ДС амалда ўзгармайди (1,а-расм); бу ҳароратдан паст соҳаларда юқори ҳарорат фазали доменлар ($\mathbf{M} \parallel [111]$) ўрнига сакраш билан [100] ўқига ориентацияланган \mathbf{M} векторли паст ҳароратли магнит фазали доменлар пайдо бўлади (1,б-расм). Ҳарорат яна пасайтирилганда янги доменлар сони ортиб, уларнинг кенглиги амалда ўзгармайди ва натижада $T \approx 120$ К да янги доменлар намунанинг кузатиб бўладиган юзасида “ўсиб” борди (1,в-расм); $T = 120$ К дан паст ҳароратларда, яъни, экспериментда минимал эришиладиган ҳарорат $T = 85$ К гача ДС нинг кўриниши ўзгармади.

$$(\partial a / \partial H) / (\partial a / \partial H)_{\max}$$



Узлуксиз чизик – эксперимент ($\mathbf{H} \parallel \langle 111 \rangle$), узлукли чизик (пастки ҳарорат шкаласи) – (3) формула бўйича ҳисобланган. Намуна микроскоп фокал текслигига домен структураларни тадқиқ этган каби ориентацияланган

2-расм. Ўз максимал қийматига нормалаштирилган намуна магнитооптик сингдирувчанлигининг ҳароратга боғлиқлиги

Ҳарорат $T = 85$ К дан оширилганда домен конфигурация эволюцияси тескари тартибда бориши аниқланди: Φ_{111} фаза доменлари аста-секин Φ_{100}

фаза доменлари ўрнини айнан ўша ҳарорат интервали ($\Delta T \approx 10$ К) да эгаллай бошлади, аммо, домен структура қайта тизимланиши бошланғич в охириги ҳарорати намунани совутилганда олинган ҳароратлардан 5 К юқорига силжийди.

2-расмда тадқиқот этилган намунанинг текслигида [111] йўналиш бўйича ориентацияланган **H** да максимал қийматига нормалаштирилган $(\partial F/\partial H(T))_{\text{макс}}$ (F – фарадей айланиш бурчаги) магнитооптик сингдирувчанликнинг ҳароратга боғлиқлиги келтирилган. Маълумки, юқори ҳароратларда $T \approx 132$ К гача $(\partial F/\partial H(T))/(\partial F/\partial H(T))_{\text{макс}}$ нисбат амалда ҳароратга боғлиқ эмас, аммо, ундан паст ҳароратда, яъни, $T \approx 125$ К да максимумга эришиб сўнг кескин пасаяди ва $T = 85$ К да хона ҳароратидаги $(\partial F/\partial H(T))/(\partial F/\partial H(T))_{\text{макс}}$ қийматининг $\sim 75\%$ ни ташкил этди.

3-расмда ўзининг минимал қиймати $H_{\text{к(мин)}} = H_{\text{к}}(T = 125 \text{ К}) = 4,2$ Э га нормалаштирилган ушбу намуна коэрцитив кучининг ҳароратга боғлиқлиги келтирилган. Шу билан бирга **H** || [111] да $T \leq 160$ К ҳарорат соҳасида Фарадей эффектнинг майдонга боғлиқлиги келтирилган ($T = 160$ К дан юқори ҳароратда гистерезис ҳалқаси тузилиши эксперимент хатолиги чегарасида T га боғлиқ эмас). 3-расмда келтирилган гистерезис ҳалқасидан кўринадики, $T = 125$ К да коэрцитив куч $H_{\text{к}}$ минималдир.

Маълумки, умумий ҳолда кўп доменли кристаллда техник магнитланганлик эгри чизигининг кўриниши иккита жараён – домен чегараси (ДЧ) нинг силжиши ва **M_s** нинг айланиши билан аниқланади (1.3 п га қаранг). Спин қайта тизимланиш соҳасида ДС беқарор бўлганда ва магнит анизатропия камайганда, H ташқи майдон ДЧ ларни интенсив силжиши ва **M_s** ни **H** томонга тез бурилишини таъминлаши керак. Шубҳасиз, T_c яқинида кристаллнинг магнит хоссаси қайси жараённинг доминантлигига боғлиқ бўлади. Буни билиш истиқболда материални техник кўллаш ҳамда адекват ОФЎ нинг назарий моделини танлашда муҳим ҳисобланади.

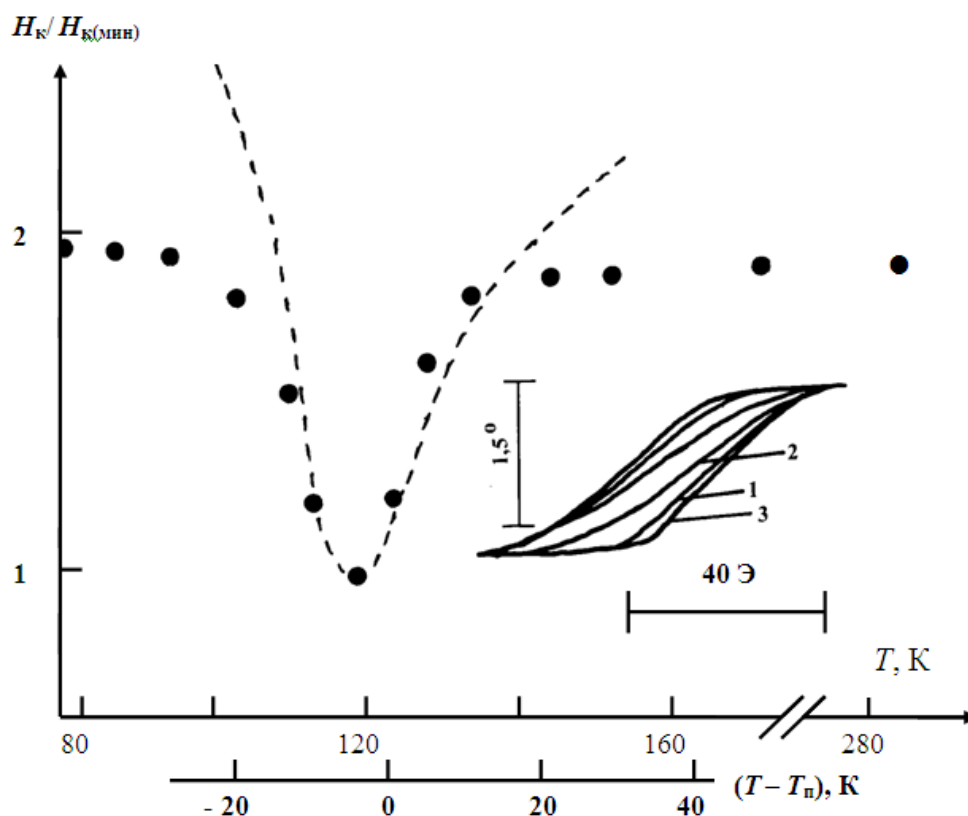
3-расмдан кўринадики, ОФЎ ҳарорати соҳасида гистерезис ҳалқаси қисқаради (коэрцитив куч $H_{\text{к}}$ камаяди), фарадей эффекти эса майдон боғлиқлиги тўйинишидан узоқда чизиқсимон кўринишга эга бўлади. Бундай гистерезиссиз магнитланганлик эгри чизиги **M** жараёнининг айланиши учун характерли ҳисобланади. Шу сабабли, тадқиқ этилган намунанинг магнит хоссалари спин қайта ориентацияланиш нуқтаси яқинида асосан **M** векторининг магнитлаш йўналиши томон бурилиши билан тавсифланади, деб хулоса қилиш мумкин. Бу ҳолатда коэрцитив куч

$$H_{\text{к}} \propto K_{\text{эфф}} / M, \quad (2)$$

магнитооптик сингдирувчанлик эса

$$\partial F/\partial H \propto M^2/K_{\text{эфф}}, \quad (3)$$

бу ерда, $T > T_c$ учун $K_{\text{эфф}} = |K_2|/3 - K_1$ ва $T < T_c$ учун $K_{\text{эфф}} = K_1$.



Нуқталар – эксперимент, узлукли чизик (пастки ҳарорат шкаласи) – (2) формула бўйича ҳисобланган. Иловада: турли ҳароратда кузатилган Фарадей эффекти магнит гистерезиси ҳалқаси осциллограммаси: 1 – 160, 2 – 125, 3 – 85 К. Намуна ориентацияси ва магнит майдон йўналиши худди $\partial F / \partial H(T)$ нисбати тадқиқот қилингани каби танланган

3-расм. Ўзининг минимал қийматига нормалаштирилган намуна коэрцитив кучининг ҳароратга боғлиқлиги

(2) ва (3) формулалар ва адабиётларда келтирилган K_1 и K_2 константаларининг ҳароратга боғлиқлиги ёрдамида $\partial F / \partial H(T) / (\partial F / \partial H)_{\text{макс}}$ ва $H_K(T) / H_{K(\text{мин})}$ боғлиқлиги ҳисобланиб 2- ва 3-расмларда келтирилган. Ҳисобланган ва экспериментларда олинган эгри чизикларни таққослаганда, (2) ва (3) формулалар тадқиқ этилган намуна ДС сининг қайта тизимланиш ҳарорати соҳасидаги коэрцитив куч ва магнитооптик сингдирувчанлигининг ҳароратга боғлиқлигини қониқарли даражада тавсифлашга имкон берди.

(2) ва (3) нисбатларидан кўринадикки, $K_{\text{эфф}}$ минимал бўлган ОФЎ нуқтасида $\partial F / \partial H$ катталиклари максимумдан, H_K катталиги эса минимумдан ўтиши керак ва бу экспериментда $T = 125 \text{ K}$ да кузатилди (2- ва 3-расмга қаранг). Бу эса $T = 125 \text{ K}$ – тадқиқ этилган намунадаги $\Phi_{111} \leftrightarrow \Phi_{100}$ фазавий ўтиш ҳарорати бўлиб, (1) формула бўйича ҳисобланган ҳароратдан $\sim 5 \text{ K}$ юқори эканлиги кўрсатилди.

Диссертациянинг тўртинчи боби «**Но_{0,6}Y_{2,4}Fe₅O₁₂ феррит-гранатида механик кучланиш таъсирида вужудга келадиган ориентацион фазавий ўтиш**» деб номланиб, унда кристаллда берилган симметрияли механик кучланишларни ҳосил қилиш усули ва Но_{0,6}Y_{2,4}Fe₅O₁₂ феррит-гранатида икки ўқли планар механик кучланиш орқали вужудга келтирилган ориентацион фазавий ўтишдаги спонтан Фарадей эффекти ҳамда ДС эволюциясининг

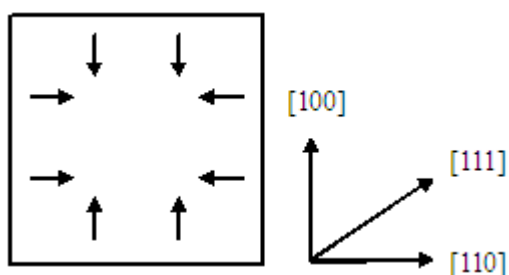
ҳароратга боғлиқлиги экспериментал тадқиқот натижалари; кубсимон ферромагнетикда механик кучланишлар орқали вужудга келтирилган ориентацион фазавий ўтишнинг назарияси ривожлантирилган.

Ривожланган текслиги квадрат шаклига эга ва (110) кристаллографик тексликка параллел бўлган $\text{Ho}_{0,6}\text{Y}_{2,4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ монокристаллининг ясси параллел пластинкасида механик кучланишлар орқали келтириб чиқарилган ориентацион фазавий ўтишлар тадқиқоти магнитооптик усулда амалга оширилди. Пластинкалар, унинг қарама-қарши квадрат асослари [100] ва [110] кристаллографик йўналишлар билан мос қилиб кесилган. Кристаллда механик кучланишлар ҳосил қилиш учун намуна мис шайбага тегишли равишда елимланади, бунда, унинг маркази шайба туйнуғи маркази билан тўғри келиши керак. Сўнг намуна ўрнатилган шайба азотли оптик криостат совуқ ўтказгичига елимланди. Ҳарорат хона ҳароратидан пасайтирилганда шайба деформацияланади (унинг диаметри кичраяди) ва намунага қайишқоқ кучланиш таъсир этади. Натижада [100] ва [110] типдаги ўқлар бўйлаб (110) текслигига ориентацияланган сиқувчи кучлар намунада механик кучланишларни вужудга келтирди (4-расм). Кристалга йўналиш бўйлаб таъсир этувчи эффектив кучланиш куйидагича топилади

$$\sigma \approx C \Delta u,$$

бу ерда, C – қайишқоқ бикирлик коэффиценти, Δu – деформация тензорининг диагонал компонентларидан бири.

Тадқиқ этилган $\text{Ho}_{0,6}\text{Y}_{2,4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ кристали ДС 5-расмда келтирилган, ундан кўринадики, механик кучланишлар бўлмаганда намуна домен конфигурацияси (110) тексликда кўшўқли симметрияга эга бўлади: доменлар тўғри кесимлар билан ажратилган бир жинсли магнитланган турли даражадаги қора соҳалар сифатида кўринади; уларнинг йўналиши [111] йўналишига ёки [111] йўналишлари орасидаги бурчак биссектрисасига яқин бўлади (5,а-расм).



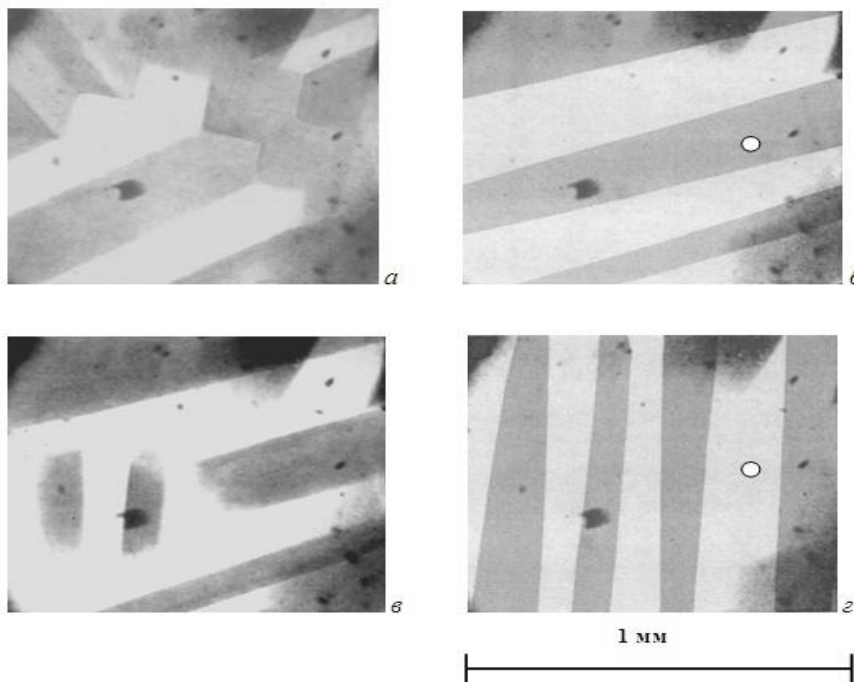
4-расм. Тадқиқ қилинадиган намунанинг схематик тасвири

Стрелкалар – намунани сиқувчи кучлар йўналиши. Ўнг томонда – намуна текслигидаги асосий кристаллографик йўналишларнинг ориентацияси.

$\text{Ho}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ феррит-гранат системаларини кўпгина экспериментал тадқиқотлар кўрсатадики, ушбу ферромагнетикларда барқарор спонтан магнит момент йўналиши [111] типдаги йўналиш ҳисобланади. Бунини инобатга олиб, 5,а-расм асосида тадқиқ этилган кристал ДС си \mathbf{M} вектори (110) тексликда ётган 180-, 110-, 70° ли домен чегарага эга доменлардан ташкил топган деб хулоса қилиш мумкин.

Кузатишлар шуни кўрсатадики, кристални сиқувчи кучлар таъсирида унинг ДС сезиларли даражада ўзгаради. Аввал, кучланиш катталиги

$\sigma \approx -2,5 \times 10^9$ дин/см² га етганда 100- ва 70° ли домен чегаралар йўқолиб, намуна тасвирида [111] ўқларининг бир-бирига параллел бўлган домен чегарасига эга доменлар қолади (5,б-расм). Бундай 180° ли полосали домен структура $\text{Ho}_{0,6}\text{Y}_{2,4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ да $\sigma \approx -2,5 \times 10^9$ дин/см² гача мавжуд бўлади. σ нинг ортиши билан намунанинг марказий қисмида эски доменлар ўрнига сакраш билан [100] ўқи бўйлаб ориентацияланган яққол кўриладиган чегарага эга тўғри бурчакли янги доменлар пайдо бўлди (5,в-расм). Янги доменларнинг узунлиги кучланиш ортиши билан ортди ва $\sigma \approx -3 \times 10^9$ дин/см² да янги доменлар намунанинг кузатиб бўладиган юзасида “ўсиб” борди.



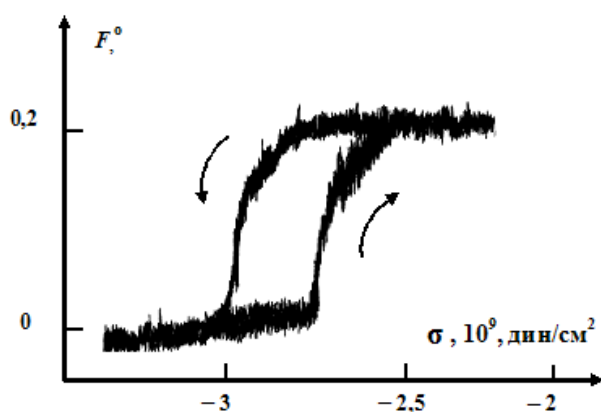
а – 0 (“кучланишсиз” намуна), б – -1×10^9 , в – $-2,5 \times 10^9$, г – -3×10^9 дин/см². Намуна микроскоп фокал текслигига нисбатан [100] ўқи атрофида $\approx 15^\circ$ га бурилган (домен чегараси ўртгача йўналишларига перпендикуляр бўлган ўқга). Намуна юзасидаги нуқта билан Фарадей эффекти тадқиқи учун лазер нури фокусланганлиги кўрсатилган

5-расм. Турли катталikka эга сиқувчи кучланишлар таъсирида $\text{Ho}_{0,6}\text{Y}_{2,4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ феррит-гранати юпка пластинкасининг домен структураси тасвири

б-расмда 5б,в-расмдаги намуна юзасида лазер нури фокусланган нуқта олинган бўлиб, у $2 \times 10^9 \leq |\sigma| \leq 3 \times 10^9$ дин/см² соҳасида спонтан Фарадей эффектининг ҳароратга боғлиқлиги келтирилган. б-расмдан кўринадики, $\text{Ho}_{0,6}\text{Y}_{2,4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ кристаллида кучланиш $|\sigma| > 3 \times 10^9$ дин/см² бўлганда спонтан Фарадей эффекти нолга тенг бўлади. Демак, $|\sigma| > 3 \times 10^9$ дин/см² да намуна ўлчов нуқтада ёруғлик тарқалиш йўналишида локал вектор \mathbf{M} нинг проекцияси мавжуд бўлмайди. Ёруғликни домен марказида жойлашган нуқтага фокусланганлигини инобатга олиб (5б,в-расмга қаранг) $|\sigma| > 3 \times 10^9$ дин/см² да намунада вужудга келадиган домен структурадаги \mathbf{M} вектори (110) текслигидан чиқмайди ва [100] йўналиш бўйлаб ориентацияланади.

Амалга оширилган тадқиқотлар натижаларини тавсифлашда, аввал, шуни таъкидлаш керакки, $\sigma \approx -10^9$ дин/см² яқинида намуна домен структураси қайта тизимланиши (5,б-расм), шубҳасиз магнит ориентацион фазавий ўтиш билан боғлиқ эмас, чунки, кристалдаги енгил магнитланиш ўқи йўналиши ўзгармаган. Домен структураларнинг бундай ўзгаришини қуйидагича тушунтириш мумкин, механик кучланишлар феррит-гранатларнинг магнит симметриясини пасайтиришини инобатга олиб кристални сиқувчи кучланишлар йўналиши билан маълум энг кичик бурчак ҳосил қилиб энг енгил ўқларни танлайди.

Экспериментларда намуна ён томонларига сиқувчи кучлар симметрик таъсирига қарамасдан (4-расмга қаранг) кристаллографик ориентацияда мавжуд бўлган хатоликлар туфайли (110) тексликда ётувчи [111] ўқлари вужудга келаётган кучланишга тўлиқ эквивалент бўлмайди. Бундай ноэквивалентлик натижасида кристални сиқувчи кучлар ошиши билан кучланишнинг маълум катталигида **M** векторлари энергетик жиҳатдан қулай бўлган [111] йўналиши бўйлаб тизилади ва намунанинг домен структураси икки ўқлидан бир ўқлига айланади.



6-расм. Намуна юзасида лазер нури фокусировка қилинган нуқтадан олинган спонтан Фарадей эффектнинг кучланиш катталигига боғлиқлиги, 5 б,г-расмда белгиланган

Намуна [100] ўқи атрофида бурилганки, тексликка тушаётган ёруғлик $\approx 15^\circ$ ни ташкил этади. Стрелкалар билан кучланиш катталиклари ўзгаришининг йўналиши кўрсатилган.

$2,5 \times 10^9 \leq |\sigma| \leq 3 \times 10^9$ дин/см² соҳасида намунада домен структурасининг қайта тизимланиши натижасида умуман бошқа вазият кузатилади: σ катталиклари юқори ва пастки чегаралари интервалида доменларда **M** векторларини турли кристаллографик йўналишлар бўйлаб ориентацияланади, яъни, кристалда енгил ўқ йўналишлари ўзгаради. Ўз навбатида бу $2,5 \times 10^9 \leq |\sigma| \leq 3 \times 10^9$ дин/см² да $\text{Ho}_{0,6}\text{Y}_{2,4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ кристаллида сиқувчи кучлар таъсирида ориентацион фазавий ўтиш содир бўлиб, бунда спонтан магнит момент [111] йўналишидан [100] йўналишига қайта ориентацияланади. Домен структуранинг сакрашсимон характери ва маълум даражадаги Фарадей эффекти харорат гистерезисининг (6-расм) кузатилиши, ориентацион фазавий ўтишни I турдаги ўтиш деб, классификациялашга имкон беради.

Маълум бўлган маълумотларга асосан $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ва $\text{Ho}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ гранатларда биринчи кубик константа анизотропияси K_1 абсолют катталиги жиҳатидан иккинчи кубик константа анизотропияси K_2 дан анча катта бўлиб, бунда $K_1 < 0$ бўлади. Равшанки, $\text{Ho}_{0,6}\text{Y}_{2,4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ да ҳам аналогик вазият

кузатилиши керак, шунинг учун K_2 га боғлиқ ўтиш назарий жиҳатдан кўриб чиқилганда кристал термодинамик потенциали ҳиссасини инобатга олмаса бўлади.

Кристалнинг сиқилиши билан боғлиқ магнит анизотропияни сиқувчи кучлар йўналишини инобатга олиб иккита константа билан ифодалаш мумкин: $[100]$ ўқи билан бир ўқли анизотропия константаси:

$$K_{100} = \frac{3}{2} \sigma \Lambda_{100}, \quad (4)$$

ва $[110]$ ўқи билан бир ўқли анизотропия константаси билан

$$K_{110} = \frac{3}{2} \sigma \Lambda_{110}, \quad (5)$$

бу ерда, Λ_{100} ва Λ_{110} – мос равишда $[100]$ ва $[110]$ йўналишлари бўйлаб магнитострикция константалари. Маълумки, $Y_3Fe_5O_{12}$ ва $Ho_3Fe_5O_{12}$ гранатлари манфий магнитострикция билан характерланади, бунинг асосида тадқиқ этилаётган кристалда Λ_{100} ва Λ_{110} константаларини ҳам манфий ҳисоблаш мумкин, чунки, кристални сиқишда $\sigma < 0$ бўлиб, (4),(5) га биноан $K_{100}, K_{110} > 0$ бўлади.

Намунанинг алоҳида домендаги термодинамик потенциали зичлиги \mathbf{M}_s вектори ориентациясига боғлиқлиги K_1, K_{100}, K_{110} константаларнинг ишораларини ҳисобга олган ҳолда $[100]$ кристаллографик йўналишига параллел бўлган қутбли ўқли қутбли координата системаси бир компонентли ёндашувда қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$\Phi = -K_1 \left(\frac{1}{4} \sin^4 \theta + \sin^2 \theta \cos^2 \theta \right) + K_{100} \sin^2 \theta + K_{110} \cos^2 \theta,$$

бу ерда, θ – (110) текслигида $[100]$ йўналиши билан \mathbf{M} орасидаги ҳосил бўлган бурчак.

Доменлардаги \mathbf{M}_s векторларининг мувозанат йўналишлари $\Phi \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \theta} = 0, \right.$

$\left. \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} \geq 0 \right)$ потенциалнинг стандарт минимум шартларидан топилади ва улардан қуйидагилар келиб чиқади:

- 1) $(K_{100} - K_{110}) \geq |K_1|$ да $\theta = 0$ ($\mathbf{M}_s \parallel [100]$);
- 2) $(K_{110} - K_{100}) \geq |K_1|/2$ да $\theta = 90^\circ$ ($\mathbf{M}_s \parallel [110]$);
- 3) $(K_{110} - K_{100}) \leq |K_1|/2$ да $\theta = \arccos [2(K_{100} - K_{110})/3K_1 + 1/3]^{1/2}$.

$K_{100}, K_{110} = 0$ шароитда бурчак $\theta = \arccos (1/3)^{1/2} \approx 55^\circ$ ($\mathbf{M}_s \parallel [111]$) бўлиши равшан.

Бундан маълумки, $\mathbf{M}_s \parallel [111]$ ли бошланғич магнит фазанинг $(K_{100} - K_{110}) = |K_1|$ да $\mathbf{M}_s \parallel [100]$ фазага сакраш билан ўтади (I турдаги ўтиш), $(K_{110} - K_{100}) = |K_1|/2$ да $\mathbf{M}_s \parallel [110]$ фазага узлуксиз ўтади (II турдаги ўтиш). Демак, K_{100} ва K_{110} константалари орасидаги нисбатдан “кучланган” кристал доменларининг қайта тизимланиши манзараси умуман ўзгариши керак: биринчи ҳолатда кучланишнинг ошиши билан $\mathbf{M}_s \parallel [100]$ ли доменлар сакраб ҳосил бўлиши керак, ва бу экспериментда кузатилди (5,в-рasm); иккинчи ҳолатда доменлар \mathbf{M} нинг қайта тизимланиши бир текис бўлиши керак.

ХУЛОСА

Магнит тартибланган кристалларда спонтан ва ташқи таъсир ёрдамида келтириб чиқарилган фазавий ўзгаришлар асосида янги экспериментал натижалар олиб, мавжуд бўлган магнитли ориентацион фазавий ўтишлар термодинамик назариясини тадқиқ қилиш натижасида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$ феррит-гранат намуналарининг домен чегаралари йўналиши ҳамда вужудга келадиган домен конфигурация кристалда мавжуд бўладиган механик кучланишларга салмоқли даражада боғлиқлиги кўрсатилган.

2. Ривожланган юзалари кристаллографик тексликлар (111) ва (110) га параллел бўлган ясси параллел пластинка тузилишига эга тадқиқ этилган кристал намуналари домен структуралари модели таклиф этилган.

3. Енгил магнитланиш ўқи йўналиши спонтан қайта тизимланишида, биринчи марта бир вақтнинг ўзида паст ҳароратли ва юқори ҳароратли магнит фазалар доменлари мавжудлиги ҳамда кристалнинг домен конфигурацияси қайта тизимланиши сезиларли ҳарорат гистерезиси билан содир бўлиши кўрсатилган.

4. Тадқиқ этилган фазавий ўтиш ҳарорати яқинида кристалнинг магнитооптик сингдирувчанлиги тор (ингичка) кескин максимумга эгалиги, коэрцитив кучнинг эса камайиши аниқланган.

5. Кристалда берилган симметрияли бир жинсли бўлмаган механик кучланишлар ҳосил қилишнинг ўзига хос усули таклиф этилиб, техник магнитлаш жараёнида кристал панжара қайишқоқ деформациясининг таъсирини тадқиқ этилиши мумкинлиги кўрсатилган.

6. Биринчи марта кубсимон ферриманетик $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ да қўшўқли механик кучланишлар таъсирида вужудга келадиган магнитли ориентацион фазавий ўтишлар I турдаги фазавий ўтиш эканлиги ҳамда сезиларли даражадаги гистерезис билан кузатилиши аниқланган.

7. Қўшўқли кучланган кубсимон кристал термодинамик потенциали асосида, тадқиқ этилган ориентацион фазавий ўтишнинг феноменологик назариясини ривожлантириш имконини берган.

8. Механик кучланишлар таъсирида спонтан магнит момент йўналишининг қайта ориентацияланиши I турдаги фазавий ўтиш (енгил магнитланганлик ўқи қайта ориентацияланиши сакраш билан содир бўлади) ёки II турдаги (енгил магнитланганлик ўқи ўз йўналишини кристаллографик ўқнинг бирдан бошқасига бир текисда ўзгартиради) бўлиши кўрсатилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.29.08.2017. FM.02.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ САМАРКАНДСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

БУХАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

НИЯЗОВ ЛАЗИЗ НУРХОНОВИЧ

**ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ
В РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ФЕРРИТАХ-ГРАНАТАХ**

01.04.09 – Физика магнитных явлений

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

Самарканд – 2017 год

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2017.2.PhD/FM74.

Диссертация выполнена в Бухарском государственном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.samdu.uz) и на информационно-образовательном портале «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель: **Джураев Даврон Рахмонович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Тураев Эргаш Юлдашевич**
доктор физико-математических наук, профессор

Уринов Худоёр Омонович
кандидат физико-математических наук, доцент

Ведущая организация: **Национальный университет Узбекистан имени Мирзо Улугбека**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2017 г. в ____ часов на заседании ученого совета PhD.29.08.2017.FM02.04 при Самаркандском государственном университете. (Адрес: 140104, г. Самарканд, Университетский проспект, 15. Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40; e-mail: rektor@samdu.uz Самаркандский государственный университет Физический факультет, 1-этаж, 63-аудитория).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Самаркандского государственного университета (зарегистрирована под №__). Адрес: 140104, г. Самарканд, Университетский проспект, 15. Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2017 г.
(протокол рассылки №__ от «__» _____ 2017 г.)

М.Х.Ашуров
Председатель научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., академик

Р.М. Ражабов
Ученый секретарь научного совета по присуждению
ученых степеней, к.ф.-м.н., доцент

Д.И.Семенов
Председатель научного семинара при научном
совете по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире на сегодня в бурно развивающемся направлении физики магнетизма одним из перспективных направлений является воздействие на доменную структуру магнетиков, предназначенных для применения в компьютерных и телекоммуникационных системах, робототехнике. В этом аспекте с целью расширения их функциональных свойств, проведение фундаментальных исследований по выявлению механизмов формирования магнитных характеристик и физических процессов в редкоземельных ферритах-гранатах, является одним из важнейших задач.

В последние годы в мире внимание уделяется на изменение и управление доменными структурами ферро- и ферримагнетиков воздействием внешних факторов. В тоже время требует изучения следующие аспекты: изучение изменения доменной структуры при ориентационном фазовом переходе; магнитооптических характеристик при изменении доменной структуры; изменения вектора спонтанной намагниченности кристаллов указывает на актуальность темы данной диссертации.

В годы независимости учеными нашей республики большое внимание уделяется применению и изучению магнитооптических и воздействию на доменную структуру магнетиков. В этом направлении в изучении магнитных свойств, магнитооптических характеристик и доменных структур ферримагнетиков, а также их применению в микроэлектронных устройствах различного назначения получены ощутимые результаты. В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан, является наиболее важным обратить особое внимание на разработку эффективных механизмов внедрения достижений научных исследований, в этом аспекте повышение эффективности отрасли микроэлектротехники путем применения результатов исследований физических процессов протекающих в полупроводниковых приборах имеет важное значение.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных Указе Президента № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему 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 приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертация выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан II «Энергетика, энерго- и

ресурсосбережение».

Степень изученности проблемы. В настоящее исследование магнитооптических свойств и изменения доменных структур редкоземельных ферритов-гранатов является актуальной задачей физики магнитных явлений. При этом достигнуты очень большие успехи в исследовании монокристаллов. Теоретически и экспериментально изучены известными учеными – Вонсовским, Беловым, Гинзбургом, Звездином (Россия) и Тикадзуми (Япония). На сегодняшний день наряду с общими чертами поведения, ориентационные магнитные фазовые переходы в зависимости от физической природы индуцирующих их причин имеют некоторые специфические различия.

Следует отметить, что учеными из Узбекистана У.В.Валиевым, Б.Ю.Соколовым внесен определенный вклад в развитие этого направления. Однако анализ экспериментальных и теоретических работ последних лет, касающихся, исследований магнитооптических свойств и изменений доменных структур под действием внешних факторов показывает, что не проведены систематические исследования в этой области. Не проведены систематические исследования, как спонтанного ориентационного перехода, так и ориентационных переходов, возникающих под действием магнитного поля или механических напряжений на ферритах-гранатах.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертационная работа. Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ Бухарского государственного университета по проектам: ФА-Ф2-Ф104+Ф105 «Исследование оптических и структурных свойств сверхпроводников и магнитных материалов» (2007-2011 гг.; Ф2-ФА-Ф0383 «Сильно-коррелированные взаимодействия в сверхпроводниках и магнитных материалах и расчёт их критических параметров» 2012-2016 гг.

Целью исследования является получение новых экспериментальных результатов по спонтанным и индуцированным внешними воздействиями фазовым превращениям в магнитоупорядоченных кристаллах, а также развитие на их основе положений существующей термодинамической теории магнитных ориентационных фазовых переходов.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи исследования:**

выполнить визуальные наблюдения доменной структуры исследованных в работе магнитоупорядоченных кристаллов;

провести исследования спонтанного ориентационного фазового перехода в феррите–гранате $Tb_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$;

провести исследования ориентационного фазового перехода в феррите-гранате $Ho_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$, индуцированного в нем двухосными механическими напряжениями;

выявить изменения доменной структуры исследованных кристаллов, возникающие при ориентационных фазовых переходах;

исследовать влияние ориентационных фазовых переходов на основные магнитные характеристики кристаллов;

развить положения термодинамической теории спонтанных ориентационных фазовых переходов в кубических кристаллах;

в рамках термодинамической теории предложить модель ориентационного фазового перехода, индуцированного в кубическом кристалле двухосными механическими напряжениями.

Объектами исследования являются монокристаллы ферритов-гранатов $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$, $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ выращенные методом спонтанной кристаллизации из раствора в расплаве.

Предметом исследования являются ориентационные фазовые переходы в магнитоупорядоченных кристаллах, возникающие в них при изменении температуры, напряженности внешнего магнитного поля и величины механических напряжений.

Методы исследования. В качестве основного метода исследования ориентационных фазовых переходов в кристаллах $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$, $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ использовалась магнитооптическая визуализация доменной структуры этих кристаллов, а также ее эволюции под действием механических напряжений, внешнего магнитного поля и температуры, эффектов Фарадея и Коттона-Мутона.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые проведены прямые визуальные наблюдения эволюции доменной структуры феррита-граната $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$ при спонтанной переориентации направления оси легкого намагничивания, и показано, что вблизи температуры исследованного фазового перехода магнитооптическая восприимчивость кристалла имеет узкий резкий максимум, а коэрцитивная сила – уменьшается;

предложена модель перестройки доменной структуры феррита-граната $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$ в температурной области спонтанной переориентации оси легкого намагничивания, позволяющая непротиворечиво описать всю совокупность полученных экспериментальных результатов;

впервые выполнены экспериментальные исследования магнитного ориентационного фазового перехода, индуцированного двuosными механическими напряжениями в кубическом ферримагнетике;

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

Практические результаты исследования заключаются в том, что на основе экспериментов предложены модели изменения доменной структуры кубического ферримагнетика при спонтанном ориентационном фазовом переходе и термодинамическая теория ориентационного фазового перехода в кубическом ферримагнетике, возникающего под действием двuosных сжимающих напряжений.

Достоверность результатов исследований подтверждается использованием комплекса современных магнитооптических методов исследования магнитной структуры и основных магнитных характеристик,

исследуемых в работе кристаллов; 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.

Научная ценность исследований заключается в том, что полученные при исследованиях перестройки доменной структуры магнитоупорядоченных кристаллов при спиновой переориентации, уточняют и конкретизируют ряд важных аспектов теории магнитных ориентационных фазовых переходов, а также расширяют современные представления физики магнитных доменов.

Практическая ценность работы состоит в том, что выявленные в результате выполненных исследований закономерности перестройки доменной структуры исследованных кристаллов при спин-переориентационных магнитных фазовых переходах, а также связанное с этим изменение таких важных для практических приложений физических свойств как магнитооптическая восприимчивость, коэрцитивная сила и т.п. могут быть использованы при разработке различных приборов магнитной микроэлектроники, в частности устройств, в которых применяется термомагнитный способ записи/стирания информации.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных в работе результатов при исследовании доменной структуры редкоземельных ферритов-гранатов:

разработанная модель на основе магнитооптических свойств и изменения доменной структуры редкоземельных феррит-гранатов использована для определения направления спонтанной переориентации в выполнении гранта Р424 (Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий Национальной Академии Наук Украины, справка от 27 ноября 2017 года). Применение этих научных результатов исследований позволяет анализировать перестройку доменной структуры феррита-граната $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$;

предложенная модель использована в исследованиях напряженных состояний конструкционных элементов в лаборатории сверхпроводимости и в лаборатории «Машиностроительное производство» для изучения напряженных состояний конструкционных элементов (Рузаевский институт машиностроения, Россия, справка от 26 ноября 2017 года). Применение этих научных результатов исследований позволяет анализировать напряженные состояния конструкционных элементов;

полученные результаты по эволюции доменной структуры ферритов-гранатов при изменении температуры; феноменологическая теория спонтанного ориентационного фазового перехода; намагничивание для фазового перехода использованы при выполнении фундаментального гранта Ф-2-06 «Магнитные ориентационные фазовые переходы в редкоземельных ферритах-гранатах» для изучения процесса намагничивания в разных кристаллографических направлениях (2011-2016). (Справка Агенства по

науке и технологиям от 7 ноября 2017 года ФТА – 02-11/941). Использование научных результатов позволило освоить методику намагничивания плоскопараллельной пластинки по кристаллографическим направлениям;

полученная модель ориентационного фазового перехода термодинамической теории кубического кристалла подвергнутого механическим напряжениям использованы при выполнении фундаментального гранта ЁФ-2-1 «Исследование фазовых переходов и магнитооптических особенностей редкоземельных ферритов-гранатов учитывая ориентационные фазовые переходы» для образования механических напряженностей (2016-2017 года). (Справка Агенства по науке и технологиям от 7 ноября 2017 года ФТА – 02-11/941). Использование научных результатов позволило при разработке модели фазового перехода при напряжениях.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 8 международных и 6 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 25 научных трудах, из них 8 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, списка использованной литературы. Текст диссертации изложен на 124 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, приведены обзор международных научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе «**Основы термодинамической теории ориентационных фазовых переходов и магнитные характеристики магнитоупорядоченных кристаллов**» приведен обзор литературных данных, и имеет обзорный характер. В ней представлены основные сведения из теории фазовых переходов Ландау, а также рассматриваются: виды магнитного упорядочения кристаллов, доменная структура и основные магнитные характеристики материалов. Дан краткий обзор экспериментальных и теоретических работ по этим вопросам.

Во второй главе «**Экспериментальные установки, методика эксперимента и образцы**» приводится описание используемых образцов, приборов, методов и техники экспериментальных исследований доменной структуры, магнитных и магнитооптических свойств магнитоупорядоченных кристаллов.

Для исследований использовались монокристаллы смешанных иттрий-тербиевого и иттрий-гольмиевого ферритов-гранатов составов $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$ и $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ соответственно. Выбор этих кристаллов не случаен: в отличие от чистых РЗФГ гранаты $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$ и $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$ характеризуются относительно небольшой магнитной анизотропией, поэтому на этих кристаллах были проведены исследования соответственно спонтанного ориентационного фазового перехода и ориентационного перехода, вызванного механическими напряжениями. Кроме того, в литературе имеются данные по температурной зависимости констант анизотропии феррита-граната $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$, необходимые для интерпретации результатов исследований изменения магнитных и магнитооптических свойств этого кристалла вблизи температуры спиновой переориентации.

Все исследуемые кристаллы были синтезированы методом спонтанной кристаллизации из раствора в расплаве и имели форму объемных многогранников с размерами $\sim 6 \times 6 \times 6$ мм³, из которого вырезались плоскостопараллельные пластинки толщиной $\sim 100 \div 300$ мкм так, чтобы их развитые поверхности были параллельны либо кристаллографической плоскости (110), либо (111). Используемые в работе образцы имели поперечные размеры в плоскости $\sim 2 \div 3$ мм, поверхности которых после механической обработки и полировки алмазными пастами подвергались (для удаления

нарушенного приповерхностного слоя) травлению в ортофосфорной кислоте при $T = 200^\circ \text{C}$, после чего для снятия остаточных механических напряжений образцы в течении суток отжигались на воздухе при $T = 600^\circ \text{C}$.

В экспериментах сведения о магнитном состоянии образца извлекались из наблюдения его доменной структуры (ДС), которая визуализировалась с помощью поляризационного микроскопа магнитооптическим методом. Наблюдения ДС образцов проводились на «белом» свете «на просвет» методом магнитооптического эффекта Фарадея. Поскольку в большинстве случаев намагниченность в доменах исследуемых образцов лежала в их плоскости, наблюдения ДС осуществлялись при небольшом наклоне плоскости образца относительно светового луча (при углах падения $\theta \leq 15^\circ$): при такой ориентации образца фарадеевское вращение плоскости поляризации света возникает за счет появляющейся проекции вектора намагниченности на направление светового луча.

Основу экспериментальной установки составил поляризационный микроскоп. Оптическая часть установки имеет традиционную для фарадеевской методики схему.

Кроме визуального наблюдения ДС и ее эволюции под действием внешнего магнитного поля, механических напряжений и изменения температуры для решения стоящих в диссертации задач были проведены исследования процесса намагничивания и связанных с ним основных магнитных характеристик изучаемых кристаллов. В экспериментах исследовались петли гистерезиса магнитооптического сигнала $F(H) \propto M(H)$ (F – угол фарадеевского вращения, M – намагниченность), наблюдаемые при перемагничивании образца с частотой $25 \div 95$ Гц, а также температурная зависимость магнитооптической восприимчивости $\partial F/\partial H(T) \propto \partial M/\partial H(T)$, измеряемая в переменном магнитном поле.

Для определения пространственной ориентации векторов ферро – и антиферромагнетизма кроме перечисленных выше линейно зависящих от M магнитооптических эффектов исследовался четный по намагниченности магнитооптический эффект – магнитное линейное двулучепреломление (МЛД) света. Используемый в работе оптический криостат позволял проводить исследования в температурной области $80 \div 290$ К.

В третьей главе «Спонтанный спин – переориентационный фазовый переход в феррите-гранате $\text{Tb}_{0,26}\text{Y}_{2,74}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ » приведены исследования типов равновесной доменной структуры феррита-граната $\text{Tb}_{0,26}\text{Y}_{2,74}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, реализующейся в размагниченном состоянии кристалла. Выполнены визуальные наблюдения перестройки доменной структуры феррита-граната $\text{Tb}_{0,26}\text{Y}_{2,74}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ при спонтанной переориентации направления оси легкого намагничивания, а также влиянию перестройки доменной структуры на его магнитооптическую восприимчивость и коэрцитивную силу.

Из теории ориентационных фазовых переходов (ОФП), следует, что ориентация легкой оси намагничивания в гранатах системы $\text{Tb}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ определяется соотношением между величинами первой K_1 и второй K_2 констант кубической магнитной анизотропии, имеющих разную

температурную зависимость. При $K_1 \leq -K_2/3$ (область температур, близких к комнатной) устойчивой является ориентация \mathbf{M} вдоль осей типа $[111]$ (магнитная фаза Φ_{111}), а при $K_1 \geq 0$ – вдоль осей типа $[100]$ (магнитная фаза Φ_{100}). Как видно из приведенных соотношений, имеется область значений констант K_1 и K_2 (в некотором интервале температур), в которой фазы Φ_{111} и Φ_{100} сосуществуют (знак равенства в этих соотношениях соответствует точкам потери устойчивости фазы с определенной ориентацией \mathbf{M}).

При понижении температуры от комнатной константа K_1 меняет знак и при условии

$$9K_1 + K_2 = 0 \quad (1)$$

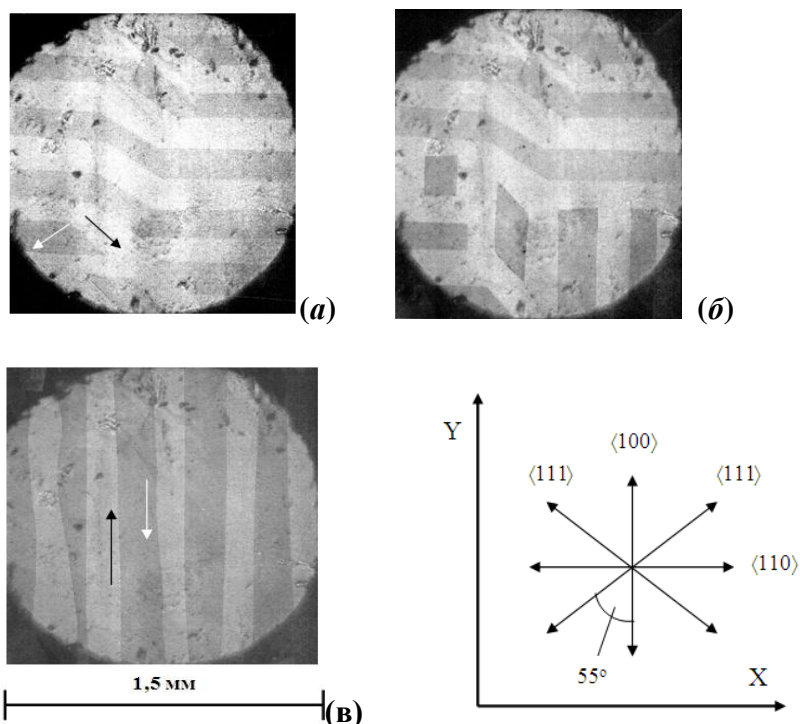
легкая ось скачком переориентируется от направления $[111]$ к направлению $[100]$. В соответствии с известной фазовой $T - x$ диаграммой, описывающей магнитное состояние $\text{Tb}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, для интересующего нас состава с $x \approx 0,26$ температура, при которой выполняется условие (1), $T_c \approx 120$ К.

Как показали визуальные наблюдения, в общем случае в реализующихся доменных конфигурациях исследованных образцов феррита-граната $\text{Tb}_{0,26}\text{Y}_{2,74}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ в зависимости от их кристаллографической ориентации присутствуют как домены, в которых вектор \mathbf{M} лежит в плоскости образца, так и домены, в которых вектор \mathbf{M} составляет некоторый угол с плоскостью образца, что значительно усложняет интерпретацию полученных экспериментальных результатов. В то же время, в образцах, ориентированных в плоскости (110) , при отсутствии в них механических напряжений возникает ДС «коттоновского» типа, соответствующая теоретическим представлениям (оси $[111]$ и $[100]$ лежат в плоскости образца). Поэтому все исследования влияния переориентации оси легкого намагничивания на ДС и основные магнитные характеристики феррита-граната $\text{Tb}_{0,26}\text{Y}_{2,74}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ были выполнены на образцах, развитые поверхности которых были параллельны кристаллографической плоскости (110) .

Из результатов визуальных наблюдений было выяснено, что ДС исследованного образца заметно эволюционировала в области низких температур. При охлаждении от $T = 290$ К ДС практически не изменялась вплоть до $T \approx 132$ К (рис.1 а); ниже этой температуры в некоторой области образца на месте доменов высокотемпературной фазы (с $\mathbf{M} \parallel [111]$) скачком возникали домены низкотемпературной магнитной фазы с ориентацией вектора \mathbf{M} вдоль оси $[100]$ (рис.1 б). По мере дальнейшего понижения температуры количество новых доменов увеличивалось, причем ширина новых доменов практически не менялась, а их длина – росла, в результате чего при $T \approx 120$ К новые домены «прорастали» на всю наблюдаемую площадь образца (рис.1 в); ниже $T = 120$ К вид ДС оставался без заметных изменений вплоть до минимально достижимой в эксперименте $T = 85$ К.

Как было установлено, при повышении температуры от $T = 85$ К эволюция доменной конфигурации образца происходила в обратном порядке: домены фазы Φ_{111} постепенно занимали место доменов фазы Φ_{100} в том же температурном интервале ($\Delta T \approx 10$ К), однако сами температуры начала и

конца перестройки доменной структуры были сдвинуты выше примерно на 5 К относительно значений, полученных при охлаждении образца.



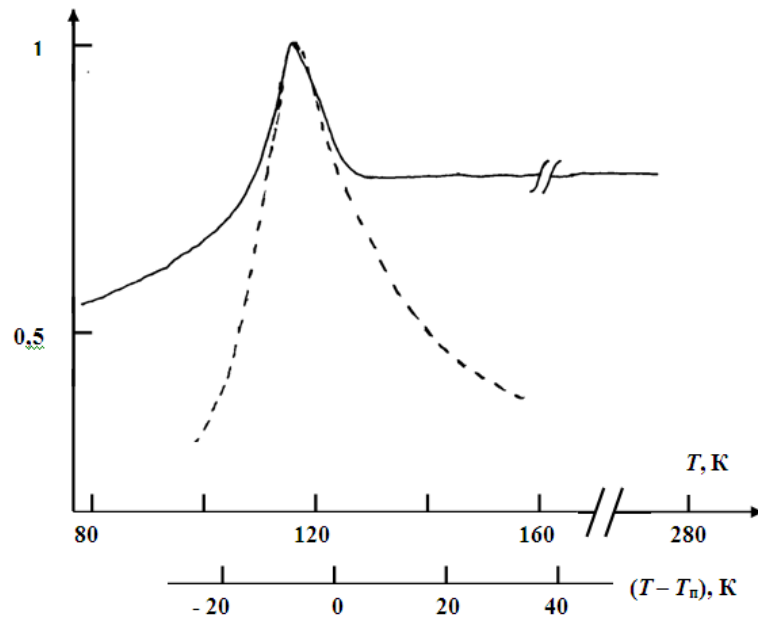
$a - 290$, $b - 129$, $в - 120$ К. Образец повернут вокруг осей X и Y относительно фокальной плоскости микроскопа на углы $\approx 15^\circ$. Стрелки указывают направление спонтанного магнитного момента в соседних доменах. На вставке: ориентация главных кристаллографических направлений в плоскости образца и осей лабораторной системы координат (ось Z – направление падающего на кристалл света)

Рис. 1. Изображения доменной структуры исследованного образца феррита-граната $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$, полученные в нулевом магнитном поле при разной температуре

На рис. 2 приведена температурная зависимость величины магнитооптической восприимчивости исследуемого образца, нормированной на свое максимальное значение $(\partial F/\partial H(T))_{\text{макс}}$ (F – угол фарадеевского вращения), полученная при ориентации \mathbf{H} в его плоскости вдоль направления $[111]$. Видно, что при высоких T отношение $(\partial F/\partial H(T))/(\partial F/\partial H(T))_{\text{макс}}$ практически не зависит от температуры до $T \approx 132$ К, ниже которой начинает расти, достигая максимума при $T \approx 125$ К, после чего резко уменьшается, составляя при $T = 85$ К $\sim 75\%$ от значения $(\partial F/\partial H(T))/(\partial F/\partial H(T))_{\text{макс}}$ при комнатной температуре.

На рис. 3 показана температурная зависимость коэрцитивной силы этого же образца, нормированной на свое минимальное значение $H_{\text{к(мин)}} = H_{\text{к}}(T = 125 \text{ К}) = 4,2$ Э. Там же приведены полевые зависимости эффекта Фарадея, измеренные при $\mathbf{H} \parallel [111]$ в температурной области $T \leq 160$ К (выше $T = 160$ К вид петли гистерезиса в пределах экспериментальной ошибки не зависит от T). Из приведенных на рис. 3 петель гистерезиса, в частности, следует, что при $T = 125$ К коэрцитивная сила $H_{\text{к}}$ минимальны.

$$(\partial\alpha/\partial H)/(\partial\alpha/\partial H)_{\text{макс}}$$



Сплошная линия – эксперимент ($\mathbf{H} \parallel \langle 111 \rangle$), пунктирная линия (нижняя температурная шкала) – расчет по формуле (3). Образец ориентирован в фокальной плоскости микроскопа так же, как и при исследованиях доменной структуры

Рис. 2. Температурная зависимость магнитооптической восприимчивости образца, нормированной на свое максимальное значение

Известно, что в общем случае вид кривой технического намагничивания многодоменного кристалла определяется двумя процессами – смещением ДГ и вращением \mathbf{M}_s (см. п. 1.3). В области спиновой переориентации, где ДС становится неустойчивой, а магнитная анизотропия уменьшается, внешнее поле H должно вызывать наиболее интенсивное смещение ДГ и наиболее быстрый разворот вектора \mathbf{M}_s в сторону \mathbf{H} . Очевидно, что магнитные свойства кристалла вблизи T_c будут зависеть от того, какой из этих процессов является доминирующим. Это важно знать как с точки зрения перспективы технического использования материала, так и для выбора адекватной теоретической модели ОФП.

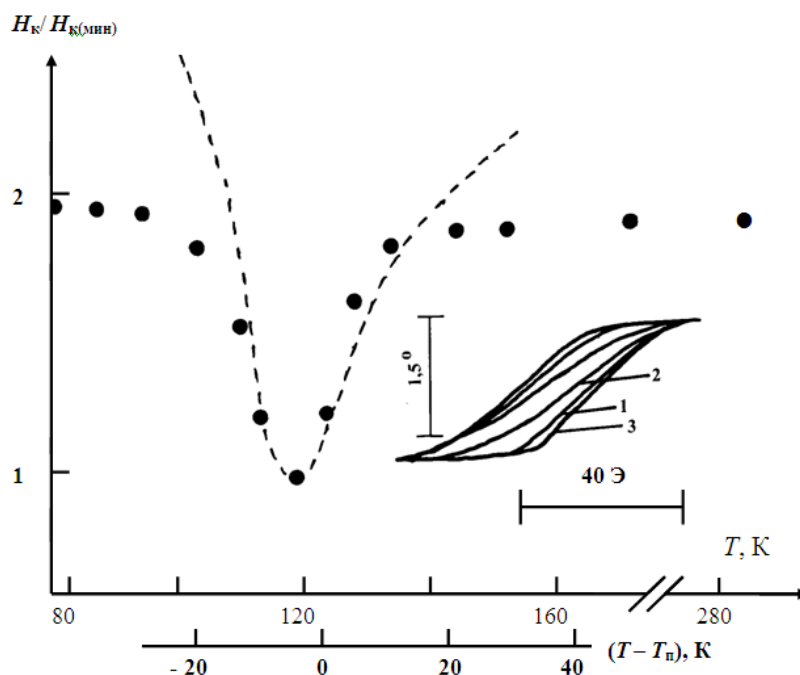
Как видно из рис. 3, в температурной области ОФП петля гистерезиса сужается (уменьшается коэрцитивная сила H_k), а полевая зависимость эффекта Фарадея вдали от насыщения приближается к линейной. Такая безгистерезисная кривая намагничивания характерна для процесса вращения \mathbf{M} . Поэтому можно заключить, что вблизи точки спиновой переориентации магнитные свойства исследованного образца определяются в основном поворотом вектора \mathbf{M} к направлению намагничивания. В этом случае коэрцитивная сила

$$H_k \propto K_{\text{эфф}} / M, \quad (2)$$

а магнитооптическая восприимчивость

$$\partial F/\partial H \propto M^2/K_{\text{эфф}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{эфф}} = |K_2|/3 - K_1$ для $T > T_c$ и $K_{\text{эфф}} = K_1$ для $T < T_c$.



Точки – эксперимент, пунктирная линия (нижняя температурная шкала) – расчет по формуле (2). На вставке: осциллограммы петель магнитного гистерезиса эффекта Фарадея, наблюдаемые при разной температуре: 1 – 160, 2 – 125, 3 – 85 К. Ориентация образца и направление магнитного поля те же, при которых была исследована зависимость $\partial F/\partial H(T)$

Рис. 3. Температурная зависимость коэрцитивной силы образца, нормированной на свое минимальное значение

Зависимости $\partial F/\partial H(T)/(\partial F/\partial H)_{\text{макс}}$ и $H_k(T)/H_{k(\text{мин})}$, рассчитанные по формулам (2) и (3) с использованием известных из литературы температурных зависимостей констант K_1 и K_2 , показаны на рис. 2 и рис. 3. Из сравнения рассчитанных и экспериментально полученных кривых видно, что формулы (2) и (3) удовлетворительно описывают температурные зависимости коэрцитивной силы и магнитооптической восприимчивости исследованного образца в температурной области перестройки его ДС.

Из соотношений (2), (3) следует, что в точке ОФП, где $K_{\text{эфф}}$ минимальна, величина $\partial F/\partial H$ должна пройти через максимум, а величина H_k – через минимум, что наблюдается экспериментально при $T = 125$ К (см. рис. 2, рис. 3). Это означает, что $T = 125$ К – температура фазового перехода $\Phi_{111} \leftrightarrow \Phi_{100}$ в исследованном образце, которая оказывается на ~ 5 К выше рассчитанной по формуле (1).

В четвертой главе «Индукцированный механическими напряжениями ориентационный фазовый переход в феррите-гранате $\text{Ho}_{0,6}\text{Y}_{2,4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ » описывается метод создания в кристалле механических напряжений заданной симметрии и представлены результаты экспериментальных исследований температурной зависимости спонтанного эффекта Фарадея и эволюции ДС

феррита-граната $\text{Ho}_{0,6}\text{Y}_{2,4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ при ориентационном фазовом переходе, индуцированном в нем планарными двуосными механическими напряжениями; развита теория индуцированного механическими напряжениями ориентационного фазового перехода в кубических ферромагнетиках.

Исследования индуцированного механическими напряжениями ориентационного фазового перехода проводились магнитооптическим методом на образце монокристалла $\text{Ho}_{0,6}\text{Y}_{2,4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ в виде плоскопараллельной пластинки, развитые плоскости которой имели форму квадрата и были параллельны кристаллографической плоскости (110). Пластинка вырезалась так, чтобы противоположные стороны ее квадратного основания совпадали с кристаллографическими направлениями [100] и [110]. Для создания в кристалле механических напряжений исследуемый образец заданным образом приклеивался к медной шайбе так, чтобы его центр совпадал с центром отверстия шайбы, после чего шайба с образцом приклеивалась к хладопроводу азотного оптического криостата. При понижении температуры от комнатной происходит деформация шайбы (ее диаметр уменьшается), которая передается образцу, вызывая его упругие напряжения. Таким образом, механические напряжения образца возникали в результате действия сжимающих его сил, ориентированных в плоскости (110) вдоль осей типа [100] и [110] (рис. 4). Эффективное напряжение вдоль направления действующих на кристалл сил определяется как

$$\sigma \approx C \Delta u,$$

где C – коэффициент упругой жесткости, Δu – одна из диагональных компонент тензора деформаций.

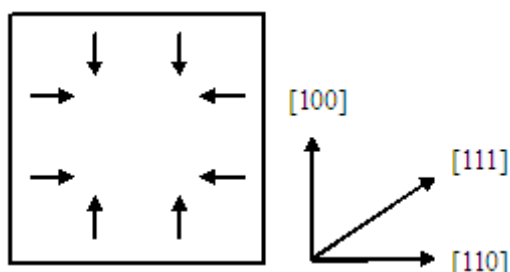
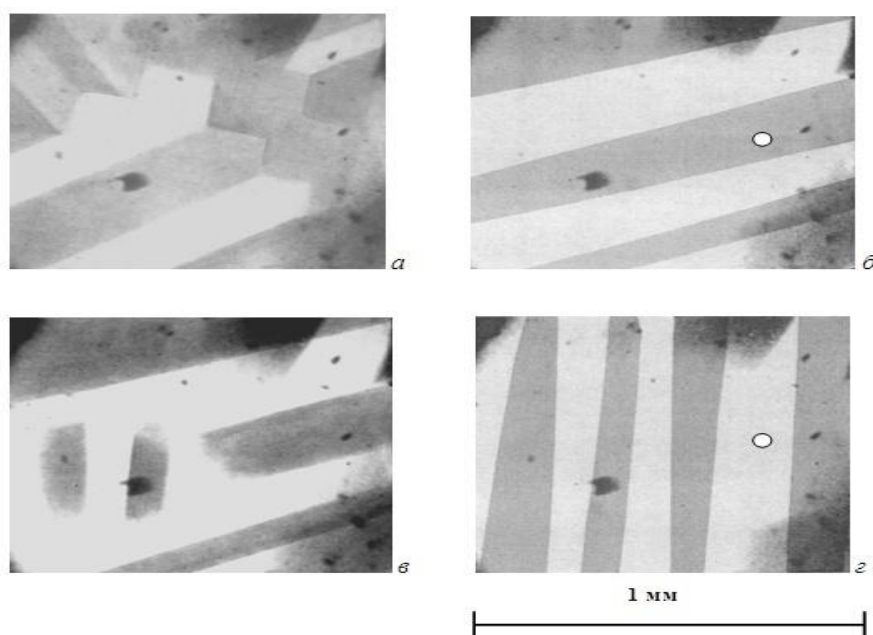


Рис. 4. Схематическое изображение исследуемого образца

Стрелки – направления сжимающих образец сил. Справа – ориентация основных кристаллографических направлений в плоскости образца.

ДС исследованного кристалла $\text{Ho}_{0,6}\text{Y}_{2,4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ представлена на рис. 5, из которого следует, что в отсутствии механических напряжений доменная конфигурация образца имеет двухосную симметрию в плоскости (110): домены наблюдаются в виде однородно намагниченных областей разной степени почернения, разделенных отрезками прямых, направление которых близко либо к направлениям [111], либо – к биссектрисе угла между направлениями [111] (рис. 5 а)

Многочисленными экспериментальными исследованиями ферритов-гранатов системы $\text{Ho}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ установлено, что устойчивыми направлениями спонтанного магнитного момента в этих ферромагнетиках являются направления типа [111]. Учитывая это, на основании рис. 5 а можно заключить, что ДС исследованного кристалла состоит из доменов, в которых вектор \mathbf{M} лежит в плоскости (110), со 180° – , 110° – и 70° – ми доменными границами.



$a - 0$ («ненапряженный» образец), $b - -1 \times 10^9$, $v - -2,5 \times 10^9$, $z - -3 \times 10^9$ дин/см².

Образец повернут на угол $\approx 15^\circ$ относительно фокальной плоскости микроскопа вокруг оси [100] (оси, перпендикулярной среднему направлению доменных границ). Точкой отмечено место на поверхности образца, куда было сфокусировано лазерное излучение при исследованиях эффекта Фарадея

Рис. 5. Изображения доменной структуры тонкой пластинки феррита-граната $\text{Ho}_{0,6}\text{Y}_{2,4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, полученные при различной величине сжимающих напряжений

Как показали наблюдения, под действием сжимающих кристалл сил его ДС существенно изменялась. Сначала при достижении напряжений величины $\sigma \approx -10^9$ дин/см² пропадали 110° – и 70° – ные доменные границы и на изображении образца оставались лишь домены с доменными границами, параллельными одной из осей [111] (рис. 5 б). Такая полосовая 180° – ная доменная структура существовала в $\text{Ho}_{0,6}\text{Y}_{2,4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ до $\sigma \approx -2,5 \times 10^9$ дин/см². При дальнейшем росте σ в центральной части образца на месте старых доменов скачком возникали новые прямоугольные домены с четкими границами, ориентированными вдоль оси [100] (рис. 5 в). Длина новых доменов росла по мере роста напряжений и при $\sigma \approx -3 \times 10^9$ дин/см² новые домены «прорастали» на всю наблюдаемую площадь образца (рис. 5 з).

На рис. 6 приведена температурная зависимость спонтанного эффекта Фарадея в области $2 \times 10^9 \leq |\sigma| \leq 3 \times 10^9$ дин/см², полученная при фокусировке излучения лазера на поверхности образца в точке, отмеченной на рис. 5 б, в. Как видно из рис. 6, при напряжениях $|\sigma| > 3 \times 10^9$ дин/см² спонтанный эффект Фарадея в кристалле $\text{Ho}_{0,6}\text{Y}_{2,4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ обращается в нуль. Следовательно, при $|\sigma| > 3 \times 10^9$ дин/см² в образце в точке измерения отсутствует проекция локального вектора \mathbf{M} на направление распространения света. Учитывая, что свет фокусировался в точке, расположенной в центре доменов (см. рис. 5 б, в), последнее означает, что в реализующейся при $|\sigma| > 3 \times 10^9$ дин/см²

доменной структуре образца вектор \mathbf{M} не выходит из плоскости (110) и ориентирован вдоль направления [100].

Переходя к интерпретации результатов выполненных исследований, прежде всего отметим, что перестройка доменной структуры образца, наблюдаемая вблизи $\sigma \approx -10^9$ дин/см² (рис. 5 б), очевидно, не связана с магнитным ориентационным фазовым переходом, поскольку при этом направление легкой оси намагничивания в кристалле осталось прежним. Эти изменения доменной конфигурации можно объяснить, если учесть, что согласно, механические напряжения понижают магнитную симметрию ферритов-гранатов, выделяя ту из легких осей, которая образует наименьший угол с направлением сжимающей кристалл силы. Хотя в экспериментах, сжимающие силы действуют симметрично на боковые стороны образца (см. рис. 4), тем не менее, из-за возможной ошибки его кристаллографической ориентации может оказаться, что оси [111], лежащие в плоскости (110), не вполне эквивалентны по отношению к возникающим напряжениям. В результате такой неэквивалентности по мере роста сжимающих кристалл сил при некоторой величине напряжений векторы \mathbf{M} выстраиваются вдоль наиболее предпочтительного с энергетической точки зрения направления [111], и как следствие, доменная структура образца изменяется, превращаясь из двухосной в одноосную.

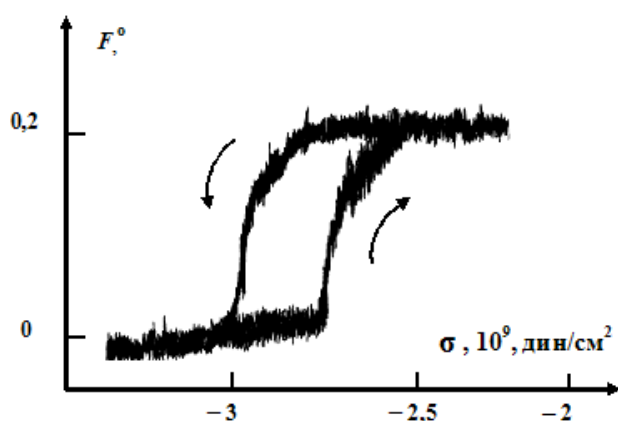


Рис. 6. Зависимость спонтанного эффекта Фарадея от величины напряжений, полученная при фокусировке излучения лазера на поверхности образца в точке, отмеченной на рис. 5 б, в

Образец повернут вокруг оси [100] так, чтобы угол падения света на его плоскость составлял $\approx 15^\circ$. Стрелками показано направление изменения величины напряжений.

Принципиально иная ситуация возникает при перестройке доменной структуры образца в области $2,5 \times 10^9 \leq |\sigma| \leq 3 \times 10^9$ дин/см²: выше и ниже границ этого интервала значений σ векторы \mathbf{M} в доменах оказываются ориентированными вдоль разных кристаллографических направлений, то есть направление легкой оси в кристалле меняется. Это означает, что при $2,5 \times 10^9 \leq |\sigma| \leq 3 \times 10^9$ дин/см² в кристалле $\text{Ho}_{0,6}\text{Y}_{2,4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ под действием сжимающих сил происходит ориентационный фазовый переход, при котором спонтанный магнитный момент переориентируется от направления [111] к направлению [100]. Скачкообразный характер наблюдаемого изменения доменной структуры и заметный температурный гистерезис эффекта Фарадея (рис. 6), позволяет классифицировать наблюдаемый ориентационный фазовый переход как переход I - ого рода.

По известным данным в гранатах $Y_3Fe_5O_{12}$ и $Ho_3Fe_5O_{12}$ первая константа кубической анизотропии K_1 по абсолютной величине значительно превышает вторую константу кубической анизотропии K_2 , при этом $K_1 < 0$. Очевидно, что в $Ho_{0.6}Y_{2.4}Fe_5O_{12}$ должна наблюдаться аналогичная ситуация, поэтому при теоретическом рассмотрении наблюдаемого перехода зависящим от K_2 вкладом в термодинамический потенциал кристалла можно пренебречь.

Магнитную анизотропию, обусловленную сжатием кристалла, с учетом направлений сжимающих сил можно описать двумя константами: константой одноосной анизотропии с осью $[100]$:

$$K_{100} = \frac{3}{2} \sigma \Lambda_{100}, \quad (4)$$

и константой одноосной анизотропии с осью $[110]$:

$$K_{110} = \frac{3}{2} \sigma \Lambda_{110}, \quad (5)$$

где Λ_{100} и Λ_{110} – константы магнитострикции вдоль направлений $[100]$ и $[110]$ соответственно. Известно, что гранаты $Ho_3Fe_5O_{12}$ и $Y_3Fe_5O_{12}$ характеризуются отрицательной магнитострикцией, на основании чего можно считать, что константы Λ_{100} и Λ_{110} в исследуемом кристалле так же отрицательны, а поскольку при сжатии кристалла $\sigma < 0$, то, согласно (4), (5), $K_{100}, K_{110} > 0$.

С учетом знаков констант K_1, K_{100} и K_{110} зависящая от ориентации вектора \mathbf{M}_s плотность термодинамического потенциала в отдельном домене образца в полярной системе координат с полярной осью, параллельной кристаллографическому направлению $[100]$, в одноконстантном приближении имеет вид:

$$\Phi = -K_1 \left(\frac{1}{4} \sin^4 \theta + \sin^2 \theta \cos^2 \theta \right) + K_{100} \sin^2 \theta + K_{110} \cos^2 \theta,$$

где θ – угол, образованный \mathbf{M} с направлением $[100]$ в плоскости (110) .

Равновесные направления вектора \mathbf{M}_s в доменах находятся из стандартных условий минимума потенциала Φ ($\frac{\partial \Phi}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} \geq 0$), из которых следует:

- 1) $\theta = 0$ ($\mathbf{M}_s \parallel [100]$) при $(K_{100} - K_{110}) \geq |K_1|$;
- 2) $\theta = 90^\circ$ ($\mathbf{M}_s \parallel [110]$) при $(K_{110} - K_{100}) \geq |K_1|/2$;
- 3) $\theta = \arccos [2(K_{100} - K_{110})/3K_1 + 1/3]^{1/2}$ при $(K_{110} - K_{100}) \leq |K_1|/2$.

Очевидно, что при $K_{100}, K_{110} = 0$ угол $\theta = \arccos (1/3)^{1/2} \approx 55^\circ$ ($\mathbf{M}_s \parallel [111]$)

Отсюда видно, что переход начальной магнитной фазы с $\mathbf{M}_s \parallel [111]$ в фазу с $\mathbf{M}_s \parallel [100]$ при $(K_{100} - K_{110}) = |K_1|$ происходит скачком (переход I - ого рода), а в фазу с $\mathbf{M}_s \parallel [110]$ 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 доменной структуры «напряженного» кристалла должна принципиально меняться: в первом случае с ростом напряжений домены с $\mathbf{M}_s \parallel [100]$ должны возникать скачком, что наблюдается экспериментально (рис. 5 в); во втором случае – переориентация \mathbf{M} в доменах должна происходить плавно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных новых экспериментальных данных спонтанных и индуцированных внешними воздействиями фазовыми переходами магнитоупорядоченных кристаллов, существующей термодинамической теории магнитных ориентационных фазовых переходов представлены следующие выводы:

1. Показано, что доменная структура образцов феррита-граната $Tb_{0,26}Y_{2,74}Fe_5O_{12}$, имеющих разную кристаллографическую ориентацию, как направление доменных границ, так и тип реализующейся доменной конфигурации существенно зависят от присутствия в кристалле механических напряжений.

2. Предложена модель доменной структуры образцов исследованного кристалла, имеющих вид плоскопараллельной пластинки, развитые поверхности которых параллельны кристаллографическим плоскостям (111) и (110).

3. Впервые показано, что при спонтанной переориентации направления оси легкого намагничивания, сосуществуют домены низкотемпературной и высокотемпературной магнитных фаз, а перестройка доменной конфигурации кристалла сопровождается заметным температурным гистерезисом.

4. Показано, что вблизи температуры исследованного фазового перехода магнитооптическая восприимчивость кристалла имеет узкий резкий максимум, а коэрцитивная сила – уменьшается.

5. Предложен оригинальный метод создания в кристалле неоднородных механических напряжений заданной симметрии, позволяющий проводить исследования влияния упругих деформаций кристаллической решетки на магнитное состояние и процесс технического намагничивания магнитоупорядоченных кристаллов.

6. Впервые установлено, что в двuosно напряженном кубическом ферримагнетике $Ho_{0,6}Y_{2,4}Fe_5O_{12}$, магнитный ориентационный фазовый переход I – ого рода и сопровождается заметным гистерезисом.

7. На основе термодинамического потенциала двuosно напряженного кубического кристалла развита феноменологическая теория исследованного ориентационного фазового перехода.

8. 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).

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD OF THE SCIENTIFIC DEGREES
PhD.29.08.2017. FM.02.04 AT SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

BUKHARA STATE UNIVERSITY

NIYAZOV LAZIZ NURKHONOVICH

**FEATURES OF MAGNETIC PHASE TRANSITIONS IN REAR EARTH
IRON-GARNETS**

01.04.09 – Physics of magnet phenomena

**ABSTRACT OF DISSERTATION OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) ON
PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Samarkand – 2017 year

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.2.PhD/FM74.

Dissertation has been prepared at the Bukhara State University.

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

Scientific supervisor: **Djuraev Davron Raxmonovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: **Turayev Ergash Yuldashevich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Urinov Khudoyor Omonovich
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, docent

Leading organization: **National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek**

Dissertation defense will be held on «____» _____2017 at _____ at the meeting of Scientific Council number PhD.29.08.2017.FM.02.04 at Samarkand State University. (Address: University Boulevard 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, Ph.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; fax: (99866) 239-11-40; e-mail: rektor@samdu.uz. cabinet 63, ground floor, the department of Physics, Samarkand State University).

Dissertation is possible to review in Information Resource Centre at Samarkand State University (is registered №____) (Address: University Boulevard 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, Ph.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; fax: (99866) 239-11-40.

Abstract of dissertation sent out on «____» _____2017 year
(Mailing report № _____ on «____» _____2017 year)

M.Kh.Ashurov
Chairman of scientific council
on award of scientific degrees,
DSc in physics and mathematics, academician

R.M.Radjabov
Scientific secretary of scientific council
on award of scientific degrees,
CSc in physics and mathematics, docent

D.I.Semenov
Chairman of scientific seminar under scientific
council on award of scientific degrees,
DSc in physics and mathematics

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research work is to provide new experimental results on spontaneous and induced by external influences phase transitions in magnetically ordered crystals, as well as the development based on these provisions of the existing thermodynamic theory of magnetic orientation phase transitions.

The objects of the research work are single crystals of iron garnets $\text{Tb}_{0,26}\text{Y}_{2,74}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Ho}_{0,6}\text{Y}_{2,4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, grown by spontaneous crystallization from a molten solution.

Scientific novelty of the research work is as follows:

For the first time carried out direct visual observation of the evolution of the domain structure of iron garnet $\text{Tb}_{0,26}\text{Y}_{2,74}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ during spontaneous reorientation direction of the easy axis, and it is shown that near the phase transition temperature of the studied magneto-optical susceptibility of the crystal has a narrow sharp peak, and the coercive force - is reduced.

The model of restructuring of the domain structure of iron garnet $\text{Tb}_{0,26}\text{Y}_{2,74}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ in the temperature region of spontaneous reorientation of the easy axis, allowing consistently describe (qualitatively) the totality of the experimental results.

For the first time carried out experimental studies of the magnetic orientation phase transitions induced biaxial mechanical stresses in a cubic ferrimagnet.

The development of the phenomenological theory of induced mechanical stresses orientation phase transition in REIG.

Implementation of the research results. On the basis of the results obtained in the study of the domain structure of rare-earth iron garnets:

the developed model based on magneto-optical properties and changes in the domain structure of rare-earth ferrite garnets was used to determine the direction of spontaneous reorientation in the research of the grant P424 (certificate of the Institute of Solid State Physics, Materials Science and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine from 27.11.2017). The application of these scientific results allows to analyze of restructuring of the domain structure of ferrite- garnet $\text{Tb}_{0,26}\text{Y}_{2,74}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$;

the proposed model was used in studies of stressed states of structural elements in the laboratory of superconductivity and in the laboratory "Machine-building production" for studying the strained states of structural elements (certificate of the Institute of Mechanical Engineering, Russia, from 26.11.2017). Application of these scientific research results allows analyzing the stressed states of structural elements;

the obtained results on the evolution of the domain structure of garnet ferrite with a temperature change; phenomenological theory of spontaneous orientational phase transition; magnetization for the phase transition were used in the implementation of the fundamental grant Φ -2-06 "Magnetic orientational phase transitions in rare-earth iron garnets" (2011-2016) to study the magnetization process in different crystallographic directions. (certificate of the Agency for

Science and Technology FTA - 02-11 / 941 from 07.11.2017). The use of scientific results made it possible to master the method of magnetization of a plane-parallel plate along crystallographic directions;

the suggested model of the orientational phase transition of the thermodynamic theory of a cubic crystal subjected to mechanical stresses was used in the implementation of the fundamental grant ÆΦ-2-1 “Investigation of phase transitions and magneto-optical features of rare-earth ferrite garnets include orientational phase transitions” (2016-2017) for formation mechanical stresses. (certificate of the Agency for Science and Technology FTA - 02-11 / 941 from 07.11.2017).The use of scientific results allowed for the development of a phase transition model under stresses.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of references. The text of the dissertation consists of 124 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Djuraev D.R., Niyazov L.N., Sokolov B.Yu. / Transformation of the domain structure of a cubic ferrimagnetic material at spontaneous spin flip of the easy magnetization axis // Russian Physics Journal, 2011, Vol. 43 Issue 7, -P. 779-784. . [№11, Springer, IF=0.667]
2. Niyazov L.N. Sokolov B.Yu. / Magnetic orientational phase transition in a biaxially strained single crystal $\text{Ho}_{0.6}\text{Y}_{2.4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ // Journal of Physics of Solid State, 2012, Vol.54, Issue 6, -P.1106-1111. [№11, Springer, IF=0.831]
3. Djuraev D.R., Niyazov L.N., Saidov K.S., Sokolov B.Yu./ Investigation of the spontaneous spin-flip phase transition in terbium-yttrium iron–garnet by the magneto optic method // Ukrainian journal of physics 2012, Vol. 57, № 5, -P. 531-537. [№40, Research Gate, IF=0.181]
4. Niyazov L.N., Djuraev D.R. / Investigation of evolution of domain structure in iron garnet $\text{Tb}_{0.26}\text{Y}_{2.74}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ // Journal of Solid State Phenomena. Switzerland. 2014, Vol. 215, -P. 427-431. [№40, Research Gate, IF=0.39]
5. Ниязов Л.Н., Соколов Б.Ю. / Магнитооптические исследования доменной структуры гольмиевого феррита-граната вблизи температуры магнитной компенсации // Журнал. Узбекский физический журнал. Ташкент: 2011г., № 6, С. 410-415. [01.00.00, № 5]
6. Джураев Д.Р., Ниязов Л.Н., Саидов К.С., Соколов Б.Ю. / Изменение доменной структуры кубического ферримагнетика в области «spin flip» перехода. // Журнал. Узбекский физический журнал. Ташкент: 2011г., №5, -С. 359-366. [01.00.00, № 5]
7. Ниязов Л.Н. / Тербий-иттрий феррит-гранатларида магнитли фазавий ўтишларнинг хусусиятлари// Бухоро давлат университети илмий ахбороти. Бухоро. 2013, № 4(52), 18-22 бет. [01.00.00, № 3]
8. Ниязов Л.Н. / Исследование доменной структуры монокристалла феррита-граната $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ подвергнутого двухосным напряжениям// Бухоро давлат университети илмий ахбороти. Бухоро. 2017, № 1(65), 34-39 бет. [01.00.00, № 3]

II бўлим (II часть; II part)

9. Л.Н.Ниязов / Изменение доменной структуры гольмиевого феррита-граната вблизи магнитной компенсации // Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы. Ростов на Дону: 2013, № 9, -С. 26-28.

10. Ниязов Л.Н. / О магнитном ориентационном фазовом переходе под воздействием двухосного напряжения в монокристалле $\text{Ho}_{0.6}\text{Y}_{2.4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ // Развитие науки и технологий. Бухара. 2015, № 2, -С. 125-129
11. Niyazov L.N., Djuraev D.R. / Investigation of evolution of domain structure in iron-garnet $\text{Tb}_{0.26}\text{Y}_{2.74}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ // V Euro-Asian symposium “Trends in MAGnetism”: Nanomagnetism EASTMAG 2013. Vladivostok. 2013, -P. 52
12. Джураев Д.Р., Ниязов Л.Н. / Магнитооптическое исследование монокристалла $\text{Ho}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ // 8-ая Международная конференция «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование». Алматы. 2013, -С. 161-162
13. Niyazov L.N. / The spontaneous spin-flip transition in terbium-yttrium iron-garnet // Donostia International Conference on Nanoscaled Magnetism and Applications (DICNMA). San Sebastian. 2013, -P.331
14. Ниязов Л.Н., Джураев Д.Р., Соколов Б.Ю. / Спонтанный ориентационный фазовый переход в кубическом ферритмагнетике тербий в иттриевом феррите в гранате // V Байкальская международная конференция «Магнитные материалы. Новые технологии». Иркутск. 2012, -С. 83-84.
15. Джураев Д.Р., Ниязов Л.Н., Саидов К.С., Соколов Б.Ю., Хайдарова Л. / Спонтанный ориентационный фазовый переход в тербий-иттриевом феррите-гранате // Материалы Республиканской конференции (с участием учёных стран СНГ) «Современные проблемы физики полупроводников» СПФП-2011, посвящённой 20-летию независимости Республики Узбекистан. Нукус. 2011, -С.76-78.
16. Djuraev D.R., Fayziyev Sh. Sh. Niyazov L.N. / Orientational phase transition into a modulated magnetic state in the some magnetics // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM). Moscow. 2014, -P. 805
17. Д.Р. Джураев, Ниязов Л.Н. / Особенности кристаллической и доменной структуры монокристаллической пластинки $\text{Tb}_{0.2}\text{Y}_{2.8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ // VI Байкальская Международная конференция Магнитные Материалы. Новые технологии. Иркутск. 2014, -С. 89-90
18. Д.Р. Джураев, Ниязов Л.Н., Б.Ю. Соколов, Ш.Файзиев, Н.Эргашева / Ориентационные магнитные фазовые переходы феррита содержащих магнетиков // IV международная конференция «Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред». Самарканд: 2013, -С.101-102
19. Д.Р. Джураев, Ниязов Л.Н., Соколов Б.Ю. / Изменение доменной структуры в тонкой монокристаллической пластинке феррита-граната $\text{Tb}_{0.2}\text{Y}_{2.8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ // IV международная конференция «Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред». Самарканд: 2013, -С.107
20. Ниязов Л.Н. / Моддаларнинг магнит хоссаси ва магнит структуралар // “Замонавий ишлаб чиқаришнинг муҳандислик ва технологик илмий-амалий муаммолари” мавзусида профессор-укитувчилар, катта илмий ходим-изланувчилар ва магистрлар илмий-амалий анжуман материаллари. Бухоро. 2015, 3-4 б.

21. Ниязов Л.Н. / Магнитный ориентационный фазовый переход под воздействием двухосного напряжения в монокристалле $\text{Ho}_{0.6}\text{Y}_{2.4}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ // «XXI аср – интеллектуал авлод асри» худудий илмий-амалий анжумани материаллари Бухоро. 2015, 133-136 б.
22. Ниязов Л.Н. / Доменная структура гольмиевого феррита-граната вблизи температуры магнитной компенсации// Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы отраслей химической технологии». Бухара. 2015, -С. 67-69
23. Д.Р. Джураев, Ниязов Л.Н., Соколов Б.Ю. / Кристаллохимические и магнитные свойства тербий-иттриевого феррита-граната// Республиканская научно практическая конференция «Актуальные проблемы химической технологии». Бухара. 2014, -С. 25-26
24. Джураев Д.Р., Ниязов Л.Н. / Исследование механических напряжений на изменение доменной структуры в некоторых редкоземельных ферритах-гранатах// Международная научно – практическая конференция Современные тенденции развития науки и производства. Кемерово. 2014, -С. 107-110
25. Ниязов Л.Н., Норова Д. / Спонтанный ориентационный фазовый переход в кубическом ферримагнетике// Материалы Международной научно-технической конференции «Физика, электроника, электротехника». Сумы. 2016, -С. 44

Автореферат «Til va adabiyot ta'limi» журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнлари ўзаро мувофиқлаштирилди. (05.12.2017 йил)

Босишга рухсат этилди: 07.12.2017 йил
Бичими 60x44 1/16 , «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 3. Адади: 100. Буюртма: № 123.

200100, Бухоро шаҳри, М.Иқбол кўчаси, 11.

«Садриддин Салим Бухорий» МЧЖ
босмаҳонасида чоп этилди.

