

САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ФАЛСАФА ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ
PhD.29.08.2017. FM.02.04 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

БУХОРО ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ФАЙЗИЕВ ШАХОБИДДИН ШАВКАТОВИЧ

**КУЧСИЗ РОМБОЭДРИК $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ ФЕРРОМАГНЕТИКДАГИ
МОДУЛЯЦИЯЛАНГАН МАГНИТЛИ ТУЗИЛМАНИ ТАДҚИҚ ҚИЛИШ**

01.04.09 – Магнит ҳодисалари физикаси

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

Самарқанд – 2018

**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**

Файзиев Шахобиддин Шавкатович

Кучсиз ромбоэдрик $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ ферромагнетикдаги
модуляцияланган магнитли тузилмани тадқиқи қилиш.....3

Файзиев Шахобиддин Шавкатович

Исследование модулированной магнитной структуры
в ромбоэдрическом слабом ферромагнетике $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$21

Fayziyev Shakhobiddin Shavkatovich

Investigation of a modulated magnetic structure in
a rhombohedral weak ferromagnet $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works.....42

**САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ФАЛСАФА ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ
PhD.29.08.2017. FM.02.04 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

БУХОРО ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ФАЙЗИЕВ ШАХОБИДДИН ШАВКАТОВИЧ

**КУЧСИЗ РОМБОЭДРИК $FeVO_3:Mg$ ФЕРРОМАГНЕТИКДАГИ
МОДУЛЯЦИЯЛАНГАН МАГНИТЛИ ТУЗИЛМАНИ ТАДҚИҚ ҚИЛИШ**

01.04.09 – Магнит ҳодисалари физикаси

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

Самарқанд – 2018

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.2.PhD/FM76 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 «Ziyonet» ахборот таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Джураев Даврон Раҳмонович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Астанов Салих Хусенович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Салахитдинова Майсара Камолидиновна
физика-математика фанлари номзоди, доцент

Етакчи ташкилот:

Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий Университети

Диссертация ҳимояси Самарқанд давлат университети ҳузуридаги PhD.29.08.2017.FM.02.04 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 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 2018 йил « ___ » _____ да тарқатилди.

(2018 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. Жаҳонда жадал ривожланаётган магнетизм физикаси соҳасида истиқболли йўналишлардан бири компьютер технологиялари, телекоммуникация системалари ва робототехниканинг хотира аппаратларига маълумот ёзиш ёки ўчириш учун мўлжалланган антиферромагнитли диэлектрикларда магнитли модуляция тузилмаларни бошқаришга алоҳида эътибор қаратилмоқда, Бу борада домен структураларга таъсир кўрсатиш мақсадида уларда содир бўлаётган физикавий жараёнларни ва магнит характеристикаларининг шаклланиш механизмларини аниқлаш, айниқса кучсиз антиферромагнетиклар учун муҳим вазифалардан бири бўлиб ҳисобланади.

Ҳозирги кунда дунёда кучиз антиферромагнетикларда ташқи таъсир ёрдамида модуляцияланган магнитли тузилмаларини 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 модуляцияланган магнитли тузилмаларнинг ўзгаришини аниқлаш; домен структура ўзгаришининг магнитооптик характеристикаларга таъсирини аниқлаш; кристаллнинг магнит тартибининг модуляцияланишга олиб келиш механизмини аниқлаш.

Республикамизда илм фан соҳасининг ривожланишга, жумладан магнетикларни қўллаш ҳамда уларнинг магнитооптик ва домен структураларини тадқиқ қилишга катта эътибор қаратилмоқда. Бу йўналишда кучиз антиферромагнетикларнинг 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 микроэлектроника саноати қурилмаларининг самарадорлигини ошириш муҳим аҳамиятга эга.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ–2772 -сон «2017–2021 йилларда электротехника саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги Қарори ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чоратадбирлари тўғрисида»ги Қарорини ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Бугунги кунда кучсиз ферромагнит кристалларнинг магнитооптик хоссалари ва модуляцияланган магнит тузилмаларнинг ўзгаришини тадқиқ этиш магнит ҳодисалар физикасининг долзарб муаммоси ҳисобланади. Ушбу соҳа назарий ва экспериментал жиҳатдан физик олимлар – С.В.Вонсовский, К.П.Белов, Г.С.Кринчик, А.К.Звездин каби олимлар томонидан ўрганилган. Бугунги кунда умумий ҳолатлар билан бирга модуляцияланган магнитли тузилмалар, уларни юзага келтирган физикавий табиатга қараб турли специфик хусусиятга эгаллиги аниқланган.

Қайд этиш жоизки, бу соҳанинг ривожланишига Ўзбекистонлик олимлар К.М.Муқимов, У.В.Валиев, Б.Ю.Соколовлар ҳам ўз ҳиссаларини қўшганлар. Охириги йиллардаги экспериментал ва назарий тадқиқотлар шуни кўрсатдики, ташқи таъсир остидаги магнитооптик хоссалар ва модуляцияланган магнитли тузилманинг ўзгариши билан боғлиқ тадқиқотлар етарлича олиб борилмаган. Кучсиз антиферромагнетикларда фазавий ўтишнинг ташқи магнит майдон ёки ҳарорат 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 Ф-2.1.54 «Ўта ўтказувчан материаллар ва магнит диэлектриклардаги квантли жараёнларни тадқиқи» (2003-2007 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 ҳарорат ва оптик ёритилганликнинг $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ кристалли модуляцияланган магнит тузилмалари параметрлари, ҳосил бўлиш шартларига таъсирини ўрганиш, ҳамда модуляцияланган магнит ҳолатини ва кузатиладиган фазавий ўтишнинг турини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

$\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ кристаллида модуляцияланган магнитли фазанинг мавжуд бўлиш шarti ва фазовий даврининг ҳароратга боғлиқлигини экспериментал тадқиқ этиш;

модуляцияланган магнитли фазада бўлган $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ кристаллининг магнит ва магнитооптик хоссаларини экспериментал тадқиқини амалга ошириш;

модуляцияланган магнитли фазада бўлган $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ кристаллининг антиферромагнетизм локал векторининг фазовий йўналишини аниқлаш;

$\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ кристалли ММСига ташқи ёритилганликнинг таъсирини тадқиқ этиш;

олинган натижаларнинг тавсифини амалга ошириш ва мавжуд бўлган енгил текисликли антиферромагнетикларнинг модуляцияланган магнитли ҳолати назариясини ривожланириш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида кучсиз ферромагнетиклар FeVO_3 ва магний элементи қўшилган $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ монокристаллари олинган.

Тадқиқотнинг предмети кристалларнинг бир жинсли магнит ҳолатдан фазовий модуляцияланган ҳолатга ўтишини, ҳамда бундай фазавий ўтишда вужудга келадиган структурасини ва параметрларини тадқиқ этишдан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Диссертацияда модуляцияланган магнит тузилмаларни тадқиқ этишда $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ монокристаллида асосий усул сифатида домен структураларни магнитооптик визуализацияси ишлатилди, ҳамда домен структураларнинг ҳарорат, ташқи магнит майдонининг ўзгариши, ҳамда оптикавий ёритилганликнинг таъсиридан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги:

биринчи марта енгил текисликли кучсиз ферромагнетик $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ да унинг магнитланиш жараёнида содир бўладиган фазавий ўтиш ориентацияли фазавий ўтиш эканлиги ва ушбу кристаллнинг модуляцияланган магнит ҳолати структураси аниқланган;

илк бор $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ кристаллида модуляцияланган ва бир жинсли магнитли ҳолат чегарасининг ўрнатилишини кўрсатувчи фазавий диаграммаси экспериментал аниқланган;

$\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ да модуляцияланган магнит тузилманинг мавжуд бўлиш шартига ва параметрларига ёруғликнинг таъсир даражаси, ёритилиш вақтининг давомийлиги ва шу усулда ёритилиш вақтидаги антиферромагнетизм векторининг йўналишига сезиларли боғлиқ эканлиги аниқланган;

«Магнитли мавж» назарияси асосида $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ да модуляцияланган магнитли ҳолатга ўтишдаги аниқланган қонуниятларнинг назарий тавсифлаш ва ушбу кристаллдаги магнитли ҳолатнинг фазовий модуляциясини келтириб чиқарадиган асосий физикавий сабаблар аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси шундан иборатки, экспериментлар натижасида кристалл панжарада қайишқоқ деформациялар билан боғлиқ кристаллнинг базис текислигида ётадиган қўшимча магнитоқристалл анизатропиянинг мавжудлиги асосида $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ да мавжуд бўладиган фазавий ўтишнинг модуляцияланган магнит ҳолатга ўтиш модели таклиф қилинган;

кристаллнинг модуляцияланган магнит ҳолатига ўтиши, унинг асосий магнит характеристикалари (коэрцитив кучи, бошланғич магнит сингдирувчанлик, магнитли гистерезис ҳалқасининг шакли) нинг сезиларли ошишига олиб келиши аниқланган;

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги тадқиқотда қўлланилган кристалларни асосий магнит характеристикалари ва магнит структурасини тадқиқ 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, унда илк мартаба энгил текисликли кучсиз ферромагнетикнинг янги типдаги магнит тартибланиши тадқиқот натижалари бу каби магнетикларда магнит тартибнинг фазовий модуляциясига олиб келувчи асосий механизмларнинг физикавий тасаввурини кенгайтиради.

Тадқиқотнинг амалий аҳамияти шундаки, тадқиқотлар натижасида кучсиз магнит майдони, ҳамда ташқи ёритилганлик билан магнит майдони H нинг биргаликдаги таъсирлари $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ нинг локал магнит ва магнитооптик хоссаларини бошқариш имконияти мавжудлигини, яъни, маълумотларни фотомагнит ёзиш ситемаларини ишлаб чиқишда қўлланилиши мумкинлиги кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Ромбоэдрик ферромагнетикнинг домен структураси спонтан ориентацияли фазавий ўтишдаги ўзгариши ва икки ўқли кучланишлар таъсирида вужудга келадиган ориентацияли фазавий ўтиш бўйича олинган натижалар асосида:

$\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ да фазавий ўтишнинг модуляцияланган магнит ҳолатга ўтишидаги магнитооптик хоссалари ва домен структурасининг ўзгариши асосида таклиф этилган модел конструкцион элементлар кучланиш ҳолатларини ўрганишда қўлланилган (Россия машинасозлик институтининг 2018 йил 3 майдаги 20-01-752 – сонли маълумотномаси). Илмий натижанинг қўлланилиши конструкцион элементлар кучланиш ҳолатларини кучланиш йўналишига боғлиқлигини аниқлаш имконини берган;

модуляцияланган магнитли ҳолат мавжуд бўлиши чегарасини ўрнатувчи $H - T$ магнитли фазавий диаграммаси Ф-2-06 “Нодир ер элементли феррит-гранатларда магнитли ориентацион ўтишлар” (2011-2016) лойиҳада модел ишлаб чиқишда қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2018 йил 26 февралдаги 89-03-872 - сонли маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш модуляцияланган магнитли тузилмалар параметрларининг ҳарорат ва магнит майдонга боғлиқлигини аниқлаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 9 та ҳалқаро ва 12 та республика миқёсидаги илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 22 та илмий иш чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 5 та мақола нашр этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, учта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 122 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 **«Кристалларнинг модуляцияланган магнитли тузилмаси ва темир боратининг асосий физикавий хоссалари»** деб номланиб, ушбу бобда қўлланиладиган намуналар, темир боратнинг кристалли ва магнитли тузилмалари ускуналар, магнит тартибланган кристалларнинг магнит ва магнитооптик хоссалари, домен структураларни экспериментал тадқиқ қилиш усуллари ва техникаси келтирилган.

Диссертациянинг иккинчи боби **«Ромбоэдрик кучсиз ферромагнетикларнинг магнитли бир жинсли эмаслигини экспериментал тадқиқ этиш усули ва намуналар»** деб номланиб, ушбу бобда қўлланилган намуналар, енгил текисликли кучсиз ферромагнетикларнинг фазовий магнитли бир жинсли эмаслигини тадқиқ этишда фойдаланилган экспериментал қурилма ва магнитооптик усули тавсифи келтирилган.

Тадқиқотларда суюқланмада эритмадан спонтан кристаллаш усули билан синтез қилинган $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ монокристаллари (Fe ионларига нисбатан Mg нинг оғирлиги $\sim 0,1\%$ ни ташкил этган) олинган. Намуналарнинг қалинлиги ~ 50 мкм, кўндаланг кесим ўлчамлари $\sim 3 \times 3$ мм² ўсиш текислиги енгил магнитланиш текислиги ((111) текислиги) билан мос келувчи пластинка кўринишига эга. Тадқиқ этилган намуналарнинг юзалари ниҳоятда юқори оптик сифатга эга бўлиб, қўшимча ҳеч қандай механик ишлов берилмади.

Намунанинг магнит ҳолати тўғрисидаги маълумотлар унинг домен структурасини (ДС) магнитооптик усулда кузатиш орқали олинди. Экспериментал қурилманинг асосини металлографик микроскоп “Метам Р -1” ташкил этган. Домен структурани кузатиш темир боратининг максимал шаффофлик соҳаси (тўлқин узунлиги (0,5 мкм) да) намуна юзасига ёруғликнинг тушиш бурчаги кичик бўлган (нолга яқин) да поляризатор ва анализаторнинг ўтказиш бурчакларининг амалда кесишган геометрияли (ёруғлик гексагонал C_3 ўқи яқинида тарқалган) ҳолда амалга оширилди. Намунанинг магнит бир жинсли бўлмаган магнитооптик тасвири компьютерга уланган рақамли фотокамера ёрдамида олинди

Намуналар тадқиқотларни 80 ÷ 290 К. ҳароратда олиб бориш имкониятини берадиган оптик криостатда жойлаштирилди. Намуна ўрнатилган криостат голографик столчага ўрнатилиб, уни микроскоп фокал текислиги бир координата бўйлаб бир маромда автоматик ҳаракатлантириш мумкин.

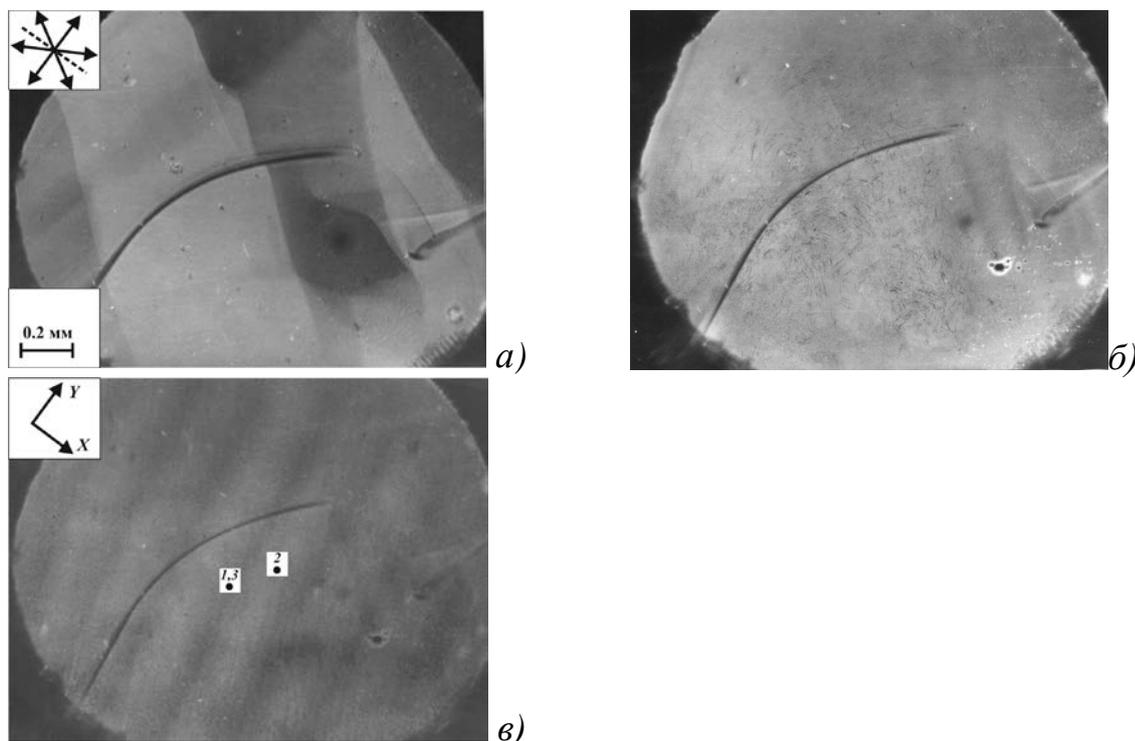
Фарадей эффектининг майдонга боғлиқлиги $F(H)$ ни квазистатик режимда магнитлаш тадқиқоти стандарт поляриметрлик усул, яъни, фарадей ячейкаси ёрдамида ёруғлик оқими интенсивлиги модуляциясининг поляризация текислигини “тебратиш” орқали амалга оширилди. Бошланғич магнитооптик сингдирувчанликни ўлчашда намуна текислигига кучсиз ўзгарувчан (гармоник қонуният билан ўзгарувчан) $h \approx 0,1 \div 0,3$ Э амплитудали ва $f = 25 \div 95$ Гц частотали магнит майдон таъсир эттирилди. Экспериментларда $\Delta I/I \propto \partial F/\partial H$ нисбати ўлчанди, бу ерда ΔI ва I – поляризатор-намуна-анализатор системасидан ўтган ёруғлик интенсивлиги ва унинг ўзгариши.

Яхши маълумки, магнитооптик анизатропия салмоқли равишда кристаллдаги ферро – \mathbf{m} ва ёки антиферромагнетизм \mathbf{l} (қоида бўйича $\mathbf{m}(\mathbf{l})$) га ҳамда кристаллни зондловчи ёруғлик қутбланиш йўналишига боғлиқ. Шу сабабли $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ нинг магнит структурасини аниқлаш (кристаллни магнитлаш жараёнида \mathbf{m} ва \mathbf{l} векторларининг фазовий ориентациясининг ўзгаришини аниқлаш) учун юқорида келтирилган манитланганлик вектори \mathbf{M} га чизиқли боғлиқ бўлган магнитооптик эффектлардан ташқари кристалл антиферромагнетизм вектори ҳосиласининг ёруғлик нурига перпендикуляр бўлганлигидан аниқланадиган магнитланганлик бўйича жуфт чизиқли боғлиқ бўлган магнитооптик эффект – мангитли иккиланган нур синиши (МЛД) ҳам тадқиқ этилди. МЛД тадқиқотлари маълум бўлган фазовий компенсация усули (Сенармон усули) да фотоприёмникка тушаётган ёруғлик қутбланиш текислиги модуляцияси орқали амалга оширилди. Кристалл намунани магнитлантириш икки жуфт Гельмгольц ғалтаглари ёрдамида бир жинсли кучланганлиги $H \leq 100$ Э бўлган магнит майдон орқали барча экспериментларда намуна текислиги бўйлаб амалга оширилди. Фотоприёмник сифатида микроскоп окулярда жойлаштирилган фотокўпайтиргич (ФЭУ – 62 ёки ФЭУ – 79); ёруғлик манбаи сифатида лампа ёки He-Ne лазери ЛГ – 126 қўлланилди. Фотомагнит экспериментларда намуна юзасига қўшимча равишда интенсивлиги $\sim 5 \times 10^{-2}$ Вт/см² бўлган қутбланмаган оқ ёруғлик фокусланиб ёритилди (ёруғлик манбаси КГМ12 –100 лампаси).

Диссертациянинг учинчи боби «**Ромбоэдрик кучсиз ферромагнетик $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ нинг модуляцияланган магнит структураси**» деб номланиб, $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ кристалли ММС ва асосий параметрларининг ҳарорат ва магнит майдонга боғлиқлиги ҳамда кристаллнинг магнит даражаси модуляциясининг магнит ва магнитооптик хоссаларига таъсирини экспериментал тадқиқотлари натижалари келтирилган. Шу билан бирга $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ нинг модуляцияланган магнит фазаси ва фотомагнит экспериментлар натижаси келтирилган. “Магнит мавж” назарияси асосида тадқиқот этилган кристалл ММСига ташқи омиллар таъсирларининг қонуниятлари изоҳланади.

$\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ ММСнинг ҳосил бўлиши учун [1, 3] да кўрсатилган шароитлар яратилди: намуна $T < T_c \approx 130$ К гача совутилиб, C_2 ўқларининг бирига перпендикуляр бўлган (111) текислиги бўйлаб магнитлантирилди. 1а-расмда $T = 290$ К да $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ намунасининг магнитсизлантирилган ДС тасвири, 1б,в-расмларда эса шу намунанинг $T = 80$ К да магнит майдони турли

кучланганлигидаги тасвири келтирилган ($\mathbf{H} \perp C_2$). 1а-расмдан маълумки, магнитсизлантирилган ҳолатда намунада C_2 ўқларидан бири яқини бўйлаб ориентацияланган домен чегарали оддий икки қатламли 180 даражали ДС га эга бўлади. Намунани (111) текислиги бўйлаб магнитлантириш одатий ҳолда амалга оширилади: \mathbf{H} вектори билан ўткир бурчак ҳосил қилувчи \mathbf{m} векторли доменлар \mathbf{m} вектори тескари ориентацияли доменлар ҳисобига кенгаяди. Аммо, $T \approx 130$ К дан паст ҳароратда [1, 3] да кўрсатилганидек C_2 ўқиға перпендикуляр йўналиш бўйича магнитлантирилганда, аввал, $H \approx 4,5$ Э да доменлар тасвири йўқолади (кристалл монодомен ҳолатга ўтади) (1б-расм), сўнг H нинг ошиши билан намунада полосалар контрасти билан фарқ қилувчи квазидаврли системалар тасвири ҳосил бўлади (1в-расм), [1, 3] да бу кристаллнинг модуляцияланган магнит тузилмасига ўтиши билан боғланган.

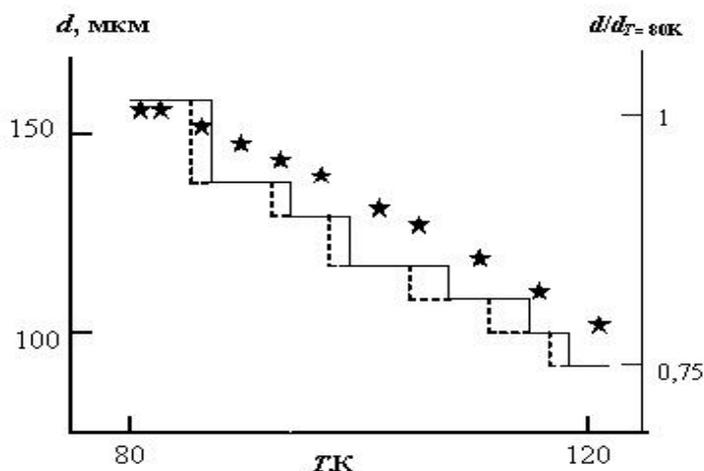


(*a* – $T = 290$ К, *b* – $T = 80$ К) ва $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ кристаллнинг тасвири. Иловада: (*a*)-иккиланган стрелка – C_2 ўқларнинг йўналиши, узлукли чизик-магнитланиш йўналиши; (*b*) стрелкалар – лаборатория системасидаги ўқларнинг ориентацияси; нуқталар – фокусланган лазер нурунинг ҳолати, магнитли иккиланган нур синишининг мос равишдаги нуқталар устидаги рақамлар билан кўрсатилган ориентацияларда олинган боғлиқлиги.

1- $H = 4,5$ (*b*) ва 6 Э (*v*) ($T = 80$ К, $\mathbf{H} \perp Y$) да домен структура (*a*) ва $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ нинг кўриниши

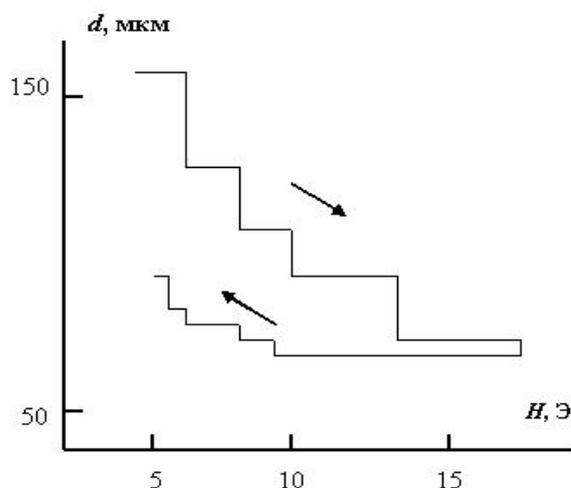
Аналогик полосалар системаси тасвирлари кристаллда C_2 нинг бошқа икки ўқиға перпендикуляр яқини бўйлаб магнитлантирилганда вужудга келади. \mathbf{H} векторининг бу йўналишлардан $\approx 10^\circ$ га бурилганда структуранинг кўриниши ўзгаради: уларнинг фазовий даври ўзгариб, сурилади, аммо, уларнинг кристалл текислигидаги йўналиши (таъсир этган магнит майдонга перпендикуляр бўлган C_2 ўқларининг бири билан мос келувчи) ва тасвир контрасти

ўзгармайди. Бу йўналишлардан магнит майдоннинг оғиши намуна тасвирида полосалар системасининг сакрашсимон йўқолишига олиб келади.



Узлуксиз синиқ чизиқ – “ёритилмаган” намуна, узлукли синиқ чизиқ – $H=0$ Э да 10 дақиқа давомида кутбланмаган оқ ёруғлик билан ёритилган намуна.

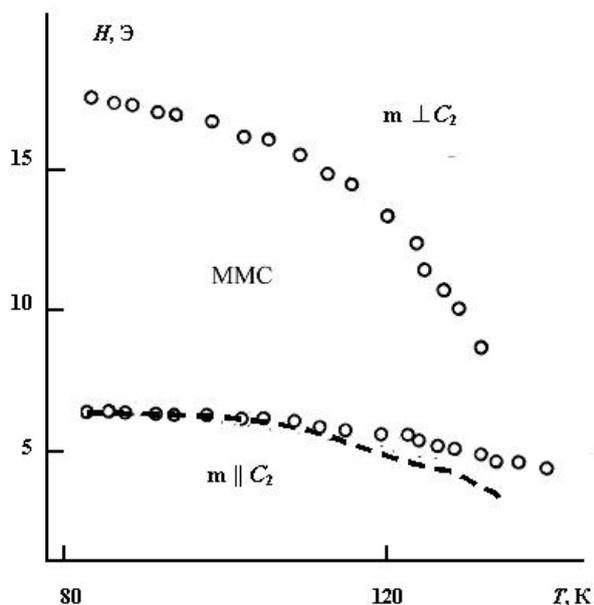
2-расм. $H = 6,5$ Э да $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ нинг модуляцияланган магнит тузилмаси фазовий даврининг ҳароратга боғлиқлиги



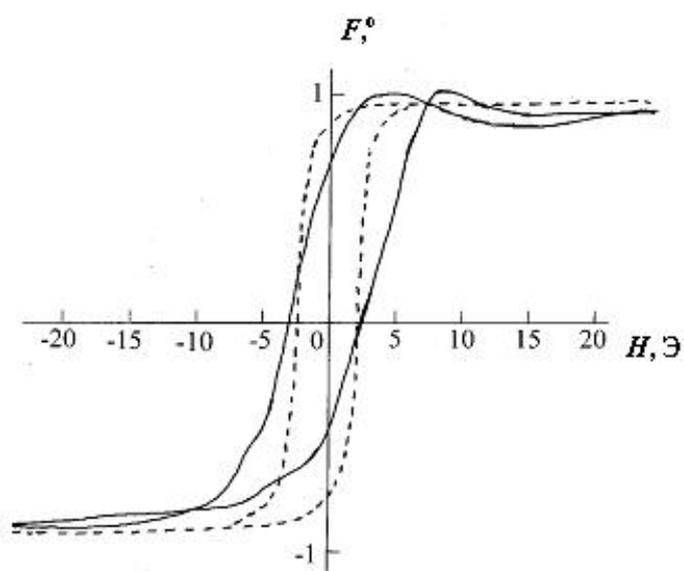
Белгилар 2-расмдаги каби. Стрелкалар билан магнитланиш жараёнида магнит майдонининг ёйилиш йўналиши кўрсатилган.

3-расм. $T = 80$ К да $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ нинг модуляцияланган магнитли тузилмаси фазовий даврининг майдонга боғлиқлиги

$\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ тасвирида вужудга келадиган полосалар системаси магнит майдоннинг маълум интервалига боғлиқ T ҳароратда мавжуд бўлади ва майдоннинг маълум критик H_c қийматида йўқолади, бунда H ва/ёки T нинг ортиши билан қўшни қора ва ёруғ полосалар контрастининг пасайиши кузатилади. Полосалар системаси даври d (қўшни ёруғ ва қора полосалар орасидаги ўртача масофа) T ва H ўзгариши билан биз кузатадиган соҳада полосалар сони сакрашсимон ўзгаради, бу 2- ва 3-расмларда зиналар сифатида $d(T)$ ва $d(H)$ боғлиқликлари графигида келтирилган. $d(H)$ боғлиқлигида маълум гистерезис бўлиши характерли бўлиб (тескари магнитлантириш жараёнида структуранинг ўртача даври H ни нольдан оширилгандагига нисбатан кичик бўлади), намуна қиздириш ва совутиш жараёнида $d(T)$ боғлиқлиги кам фарк қилади.



4-расм. FeVO₃:Mg кристаллининг магнитли ҳолати $H - T$ фазали диаграммаси



Узлукли чизик – $H \parallel C_2$; узлуксиз чизик – $H \perp C_2$.

5-расм. $T=80$ К ҳароратда H нинг икки ориентациясида тадқиқ этилган кристаллдан ўтган ёруғлик қутбланиш текислиги бурилиш бурчагининг майдонга боғлиқлиги

4-расмда экспериментал олинган $H - T$ фазавий диаграммаси келтирилган бўлиб, FeVO₃:Mg да бир жинсли ва бир жинсли бўлмаган магнит ҳолатларнинг мавжуд бўлиш чегараси кўрсатилган. MMC нинг мавжуд бўлиш соҳасини белгиловчи ҳарорат ва майдон интерваллари полосалар системасининг пайдо бўлиши ва йўқолишини бевосита визуал кузатиш орқали аниқланди. 4-расмдан маълумки, модуляцияланган магнитли ҳолат бир жинсли магнитланган кристаллнинг иккита $m \parallel C_2$ (I) ва $m \parallel H \perp C_2$ (II) фазалари оралиғида бўлади. $d(H, T)$ боғлиқлиги характеридан (ҳарорат ва магнит майдон кучланганлигининг критик қийматига етишганда давр d қиймати сакрашсимон ўзгаради) иккала $I \leftrightarrow MMC$ ва $II \leftrightarrow MMC$ ўтиш ҳам биринчи турдаги фазавий ўтиш эканлигини айтиш мумкин.

Тадқиқотлар кристаллда вужудга келадиган MMC магниттоптик сингдирувчанлиги ва Фарадей эффектининг майдонга боғлиқлигига таъсир этиши аниқланди. Мисол тариқасида 5-расмда $T < T_c$ ва магнитлантирувчи майдоннинг иккита ориентациясида Фарадей айланишининг майдонга

боғлиқлиги кўрсатилган. 5-расмдан кўринадики, $T = 80 \text{ K}$ ва $H \perp C_2$ да олинган $F(H)$ боғлиқлиги $H \parallel C_2$ да кузатиладиган аналогик эгри чизикқа нисбатан (катта коэрцитивликдан ташқари) ММС мавжуд бўладиган майдонда ($4,5 \leq H \leq 17 \text{ Э}$) F қийматли гистерезисга ҳамда $H = 0$ яқинида синикга эга бўлади ($T > 140 \text{ K}$ да $F(H)$ боғлиқлиги кристалл базис текислигида H нинг ориентациясига болиқ бўлмайди).

Ромбоэдрик кучсиз ферромагнетикларда ёруғлик оптик ўқ (C_3) бўйлаб тарқалишида МЛД катталигининг (111) текисликдаги (x,y) координатали нуктада куйидагича ифодаланади

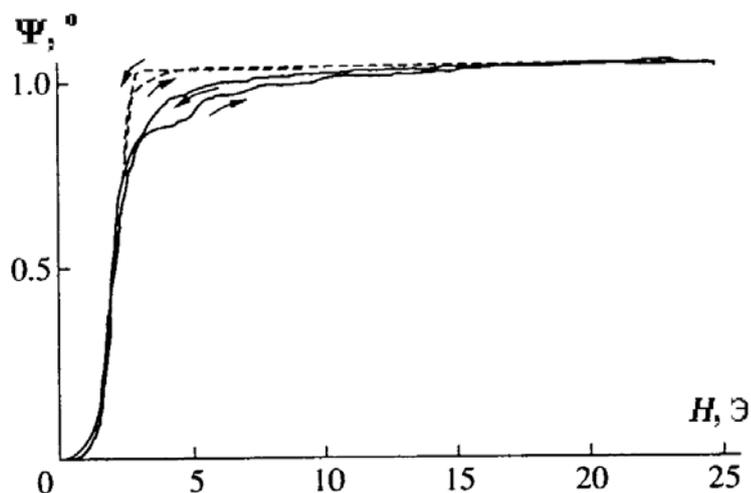
$$\begin{aligned} \psi &= \varphi(x,y) \sin 2[\theta - \beta(x,y)]; & (1) \\ \varphi(x,y) &= \varphi_0(a^2 + b^2)^{1/2}; \quad \varphi_0 = 2\pi(n_{\parallel} - n_{\perp})d/\lambda \propto |H|^2; \\ a &= d^{-1} \int_0^d \cos 2\beta(x, y, z) dz; \quad b = d^{-1} \int_0^d \sin 2\beta(x, y, z) dz; \end{aligned}$$

бунда $\beta - \mathbf{I}$ вектори проекцияси йўналишининг (111) текислиги ва лаборатория система координатаси Y ўқи орасидаги бурчаги (аниқлик учун $Y \parallel C_2$ деб оламиз, 1-расмга қаранг); $\theta -$ шу ўқ бўйича кристаллга тушаётган ёруғликнинг қутбланиш текислиги азимути; n_{\parallel}, n_{\perp} – мос равишда \mathbf{I} вектори текислик компонентаси бўйича ва кўндаланг чизикли қутбланган λ тўлқин узунлиги ёруғлигининг нур синдириш кўрсаткичлари; $d - Z$ ўқи бўйлаб кристаллнинг қалинлиги ($Z \parallel C_3$) (a ва b праметрлар C_3 ўқи бўйлаб β бурчакнинг биржинсли эмаслигини инобатга олади).

(1) дан маълумки, фиксацияланган x ва y да $\psi(\theta)$ боғлиқлиги гармоник функция сифатида бўлиб, унинг бошланғич фазаси β ва амплитудаси φ тегишли равишда (111) текисликдаги нуктада антиферромагнетизм моментининг йўналиши ва модулини ифодалайди. Демак, тадқиқотлар натижасида МЛДнинг координатали боғлиқлигидан (1) га асосланиб кристаллдаги \mathbf{I} векторининг фазовий ориентациясини ифодалаш мумкин. МЛДнинг координата ва ориентацион боғлиқлигини тадқиқот қилишда лазер нури микроскоп ёрдамида намуна юзасига $\sim 15 \text{ мкм}$ диаметрли доғ сифатида фокусланди. $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ да магнит бир жинсли бўлмаган фазовий давр $\sim 100 \text{ мкм}$ бўлганлигини инобатга олиб (1-3 расмларга қаранг), экспериментнинг бундай шароитида кристаллнинг тадқиқ этилаётган юзасини нуқтавий деб, ёруғлик доғи юзаси чегарасини $\beta(x,y) \approx \text{const}$ ҳисоблаш мумкин.

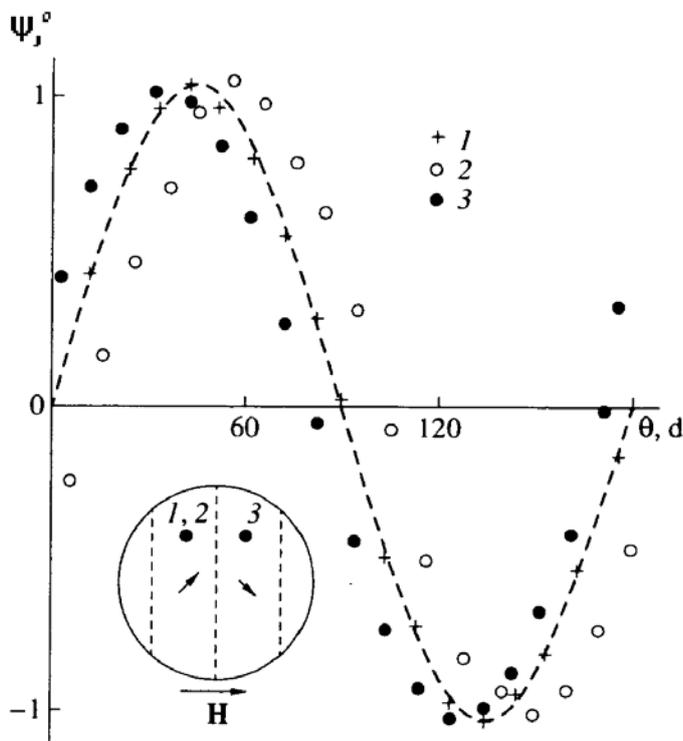
Ўтказилган тадқиқотларимиз кристаллнинг модуляцияланган магнит ҳолатига ўтиш ҳароратидан юқори ҳароратда ($T > T_c$ да) МЛДнинг майдон ва ҳароратга боғлиқлиги $\psi(H)$ ва $\psi(T)$ (111) текисликда H вектори ўзгариши билан ўзгармаслигини кўрсатди. Шу билан бирга $T < T_c$ да магнитлантирувчи майдоннинг турли ориентацияларида $\psi(H)$ ва $\psi(T)$ боғлиқлиги фарқ қилди. 6-расмда $T = 80 \text{ K}$ да H векторининг $C_2 \parallel Y$ ўқи бўйлаб ориентацияланганлиги ва ушбу ўққа перпедикуляр бўлган йўналиш бўйлаб поляризатор азимути $\theta = 45^\circ$ да $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ кристалли МЛДСининг “интеграл” боғлиқлиги (яъни, намуна

юзаси тўлиқ ёритилганда) кўрсатилган. Графикларни солиштиришдан кўринадики, магнитланганликнинг техник тўйиниши шароитида $|\psi|$ нинг қийматлари бу икки йўналиш бўйича мос келади ((1) га асосан), ammo, $|\psi|(H)$ эгри чизиқларининг силжиши кристаллда ММС нинг мавжуд бўлиш майдон интервалида ($4,5 \leq H \leq 17$ Э) $H \perp C_2$ да ўзгаради.



Узлуксиз чизик - $H \perp C_2$, узлукли - $H \parallel C_2$ (стрелкалар билан кристаллни қайта магнитланиш йўналиши кўрсатилган). Магнит майдонининг ёйилиш вақти ~ 1 мин.

6-расм. $T=80$ К ҳароратда $FeVO_3:Mg$ даги магнитли иккиланган нур синишнинг майдонга боғлиқлиги



1 - $H = 50$ Э; 2,3 - $H = 6$ Э ($H \perp Y$, $T = 80$ К). Узлукли эгри чизик $-\psi \propto \sin 2\theta$ боғлиқлиги.

Айланадаги стрелкалар билан схематик равишда I локал векторнинг намуна текислигидаги 1,2 ва 3 рақамлар билан белгиланган нуқталардаги йўналишлари кўрсатилган.

7-расм. $FeVO_3:Mg$ даги магнитли иккиланган нур синишнинг кристаллга тушаётган ёруғлик қутбланиш текислиги азимутига боғлиқлиги

7-расмда $T = 80 \text{ K}$ да магнит майдоннинг иккита қиймати 6 ва 50 Э ($\mathbf{H} \perp \mathbf{Y}$) да $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ кристаллига тушаётган ёруғлик қутбланиш текислиги ориентациясига МЛДнинг “локал” боғлиқлиги келтирилган. 7-расмдан $\psi(\theta)$ нинг экспериментал боғлиқлиги бир жинсли ва модуляцияланган магнит ҳолат учун (2) нинг гармоник функциялари билан яхши ифодаланади, бунда уларнинг амплитудаси майдоннинг кучланганлигига боғлиқ бўлмайди. Бу эса кристаллнинг қалинлиги бўйлаб ММСда магнитланганликнинг бир жинсли (яъни, $\beta(z) = \text{const}$) эканлигини билдириб, \mathbf{l} вектори (бир жинсли магнит фазадагидек) (111) базис текислигидан чиқмайди. (1) га асосан, бунда $\psi = \pm\varphi_0$ нинг экстермал қийматлари $\psi(\theta)$ боғлиқлиги (x ва y) нуқталарда $\theta = \beta \pm 45^\circ$ бўлганда содир бўлади. Бу шарт 7-расмда келтирилган графиклардан β бурчакни бевосита аниқлашга, яъни, намунанинг берилган нуқталарида Y ўқиға нисбатан \mathbf{l} вектори азимутини аниқлашга имкон беради. МЛДни ўлчашда микроскопда визуал кўринадиган кристаллнинг турли контрастга эга полосалари марказлари нуқта сифатида олинганлиги (1в-расм) сабабли: $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ ММСида $H = 6 \text{ Э}$ да \mathbf{l} вектори бурчагининг Y дан бурилиш амплитудаси $\approx 10^\circ$ ни ташкил этади.

Буни инобатга олган ҳолда (1) дан келиб чиқадики, $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ даги ММСда антиферромагнетик локал вектори азимутини фазовий координатага бир ўлчамли боғлиқлиги сифатида қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\beta = \beta_0 \cos(2\pi x/d), \quad (2)$$

бу ерда $\beta_0 - C_2 \perp \mathbf{H}$ ўқидан \mathbf{l} векторининг силжиши амплитудаси; d – магнит бир жинсли бўлмаган давр, бу $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ ММСни магнитланганлигини статик тўлқин сифатида тасаввур қилиш мумкин бўлиб, унда (β_0 бурчакнинг кичиклигини инобатга олинади) биз танлаган координата системасида (Z ўқи тарқалаётган ёруғлик йўналишига мос, X ўқи – магнит майдон йўналишига мос) \mathbf{m} ва \mathbf{l} векторлари компонентлари қуйидагича бўлади:

$$l_x = |\mathbf{l}| \sin(\beta_0 \cos kx) \approx |\mathbf{l}| \beta_0 \cos kx; \quad l_y \approx |\mathbf{l}|; \quad l_z = 0; \\ m_x \approx |\mathbf{m}|; \quad m_y = |\mathbf{m}| \sin(\beta_0 \cos kx) \approx |\mathbf{m}| \beta_0 \cos kx; \quad m_z = 0; \quad (3)$$

бу ерда \mathbf{k} – структура тўлқин вектори ($|\mathbf{k}| = 2\pi/d$, $\mathbf{k} \parallel \mathbf{X}$).

Маълумки, одатда ёруғлик таъсири магнетикларнинг магнит характеристикалари (коэрцитив куч, сингдирувчанлик, қолдик магнитланганлик ва бошқалар) жуда оз ўзгаради. Аммо, темир борати – бу ҳозирги кунда кам сонли магнит тартибланган кристаллар турига кириб, уни ёритилганда қўшимча ёритишсиз мавжуд бўлмаган хусусиятлар пайдо бўлади. Хусусан, Ni ионлари қўшилган FeVO_3 да қутбсиз оқ ёруғлик билан ёритилганда модуляцияланган магнит тузилмалар вужудга [4] келади. [4] да $\text{FeVO}_3:\text{Ni}$ да фотоиндукцирланган ММС учун таклиф этилган назариясига асосан, Fe матрица ионлари ва қўшилма Ni ионларидан ҳосил бўлган комплекслар орасидаги магнитоакустик таъсирлашув сабабли қўзғалган ҳолат вужудга

келади. Бу кўшимча ёритиш бўлмаганда камрок бўлиб, кристаллга ёруғлик нури тушганда бу хусусият ортади. Бу назария кўшимча ёритилишсиз кўшилма бўлмаган FeVO_3 да ММС мавжуд бўлишига йўл қўяди, аммо, ёруғлик кристалл модуляцияланган магнит даври параметрларига таъсир этиши керак. $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ ММС параметрларига бу таъсирни аниқлаш учун фотоманит экспериментлар ўтказилиб, бунда намунага кўшимча ёруғлик таъсир этирилди. Бу экспериментларда намуна $T = 80 \text{ K}$ гача совутилиб кўшимча равишда унинг юзасига фокусланган интенсивлиги $\sim 5 \times 10^{-2} \text{ Вт/см}^2$ кутбсиз оқ ёруғлик билан ёритилди; маълум вақт ёруғлик оқимида кўшимча ёритилгандан сўнг намунани ёритилиши тўхтатилиб, ДС ни визуал кузатилди ва Фарадей эффектлари ўлчанди.

Экспериментлар шуни кўрсатдики, $\mathbf{H} \perp \mathbf{C}_2 \parallel \mathbf{Y}$ да мавжуд бўлган намуна ДС ва полосалар системасини кутбсиз оқ ёруғлик билан кўшимча ёритилиши кўринишни ўзгартирмади. “Ёритилган” намунани X ўқи бўйлаб қайта магнитлантириш ҳам ёруғлик гистерезис халқасининг шаклига таъсир этмади. Аммо, $\mathbf{H} \parallel \mathbf{Y}$ да Фарадей эффектнинг майдонга боғлиқлигини тадқиқ қилганда магнитсизлантирилган намунани узок вақт давомида ёритиш магнит гистерезис халқаси кенглигининг ортишига (коэрцитив куч H_k нинг ортиши) олиб келади. Фарадей эффекти гистерезис халқасининг маълум даражада ўзгариши (эксперимент хатолигидан $\sim 0,02 \text{ Э}$ ошган) ёритилганлик давомийлиги $\tau > 2$ минутда, H_k қийматининг ортиши $\tau \approx 10$ минутда бўлиб, кейинчалик бошланғич ёритилганликнинг давомийлиги намуна $F(H)$ эгри чизиғига таъсир қилмади. Бундан ташқари қийин ўқлар бўйлаб магнитлантирилган Y га 30° бурчак остида ориентацияланган кристалл намунани бирламчи ёритилганда ($T = 80 \text{ K}$, $H = 0$) ММС даври ва мавжуд бўлиш шартини ўзгартирди: полосалар системасида кузатилган майдон интервали ўзгариб, “ёритилмаган” намунада кузатиладиган даври d нинг қийматига нисбатан ортди, бунда $d(H)$ ва $d(T)$ боғлиқликларининг сакрашсимон характери сақланиб қолди (2,3-расмга қаранг).

“Магнит мавж” назариясидан енгил текисликли магнетикнинг магнит бир жинсли бўлмаган даври куйидагича топилади [5]:

$$d = 2 \pi [2 A / (MH - 2 K)]^{1/2}, \quad (4)$$

бу ерда A – алмашинув константаси; M – спонтан магнитланганлик; K – C_2 ўқи бўйлаб анизатропия константаси.

(4) га асосан ММС куйидаги шартда пайдо бўлади:

$$H > H_0 = 2K/M, \quad (5)$$

бу $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ нинг гексагонал анизатропия константасини баҳолашга имкон беради. ММС пайдо бўладиган майдон қиймати $H_0 = 4,5 \text{ Э}$ ва маълум қиймат M ($T = 80 \text{ K}$) $\approx 17 \text{ Гц}$ дан фойдаланиб (5) дан $K \approx 40 \text{ эрг/см}^3$ эканлигини топамиз (турли тадқиқотларга кўра азот ҳароратида кўшилмасиз FeVO_3 да K нинг

қиймати 8 дан 13 эрг/см³ бўлиши кўрсатилган). Афсуски, FeVO₃:Mg кристаллини қайта магнитланиш жараёнида кузатиладиган d қийматли гистерезиси (2-расмга қаранг) бевосита (4) ни экспериментал олинган $d(H)$ боғлиқлик билан таққослаш имконини бермайди. Аммо, (4) формула структурасидан маълумки, бошланишида $H \geq H_0$ бўлганда $d(H)$ боғлиқлик кескин пасаяди, сўнг $H > 2H_0$ да модуляция даври оз ўзгариб, экспериментлар натижалари билан корреляцияланади.

(4) га темир борати учун аниқ бўлган қийматларни $A \approx 2 \cdot 10^{-6}$ эрг/см, $K = 40$ эрг/см³ ва майдон кучланганлигига кучсиз боғлиқ бўлган D майдон соҳаси қийматлари H да (аниқлик учун, $H = 15$ Э) олиб $d \approx 10$ мкм эканлигини топамиз, бу эса кузатилган ММС давридан беш марта кичикдир. Демак, (4) формула экспериментал кузатилган ММС даври ўзгаришини етарли даражада (гистерезис эффекти ва пинингни инобатга олмаганда) ифода этсада, унинг асосида ҳисобланган d нинг қиймати эксперимент маълумотлари билан қиймат даражасида мос келади холос.

Шу билан бирга (4) формула FeVO₃:Mg ММСига ёруғликнинг таъсирини тадқиқ этишда олинган натижаларни тушунтиришга имкон беради. Агар тахмин қилсак, бизнинг экспериментимизда кристаллни ёритишда \mathbf{m} вектори ориентацияланган йўналиш бўйлаб магнит анизатропиянинг ўсиши кузатилсин, унда $H = 0$ да кристаллни ёритилганда $C_2 \parallel Y$ ўқи бўйлаб константа K ортиши керак, шунинг учун (2 га асосан) $\mathbf{H} \parallel Y$ ўқиға 30° бурчак остида ориентацияланишида “ёритилмаган” кристаллга характерли бўлган d қийматига нисбатан ММС даврининг катталашини кузатилади ва бу эксперимент натижаларига мос келади (2,3-расмга қаранг). Агар $H = 0$ да “ёритилган” намунани X ўқи бўйлаб магнитлантисак, “ёритилган” ва “ёритилмаган” таъсирларда $\mathbf{H} \parallel X$ да пайдо бўладиган полосалар системаси даврлари фарқ қилмаслиги керак, чунки, ёритилганлик \mathbf{H} йўналиши бўйлаб C_2 нинг қиймати K ни ўзгартирмайди (бу экспериментда кузатилди). Шу билан бирга ёритилган кристаллда мавжуд бўлган ММС параметрларига ҳам таъсир қилмаслиги керак. Ҳақиқатдан ҳам, FeVO₃:Mg ММСда локал вектор \mathbf{m} магнитланганлик йўналиши бўйлаб енгил текисликнинг силжишида \mathbf{H} вектори яқинида осциляцияланади ($\mathbf{H} \perp C_2$) ((2) ва (3) формулага қаранг. Демак, модуляцияланган магнит ҳолатда бўлган FeVO₃:Mg ни ёритилганда оз миқдорда (кристаллографикка қараганда) локал бир ўқли анизатропиянинг пайдо бўлишига (фотостимуляцияланган анизатропиянинг ортиши ва \mathbf{m} ориентациясининг боғлиқлигига асосланган) олиб келиб, кристалл ММСида \mathbf{H} йўналишидан даврий равишда оғадиган \mathbf{m} вектори йўналиши модуляцияси даври, яъни, кўшимча ёритилиш кристаллнинг бошланғич магнит даражаси модуляциясини барқарорлаштириб, унинг даврини ўзгартирмайди (бу кузатишлар натижасига мос келади).

Демак, олинган натижалар $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ кристаллининг локал магнит ва магнитооптик хоссаларини ташқи ёритилиш ва майдон H нинг биргаликдаги таъсири билан бошқариш имкони борлигини кўрсатади. Паст ҳароратда кристаллнинг фотоиндукцияланган магнит бир жинсли бўлмаган параметрлари ўзгаришининг узок вақт сақланиши ($T = 80 \text{ K} \sim 60$ минут давомида) сабабли, аниқланган эффект амалий жиҳатдан аҳмиятга эга бўлиши, хусусан, маълумотларни фотомагнит ёзиш системаларида қўлланилиши мумкин.

ХУЛОСА

Кучсиз антиферромагнетикда ташқи таъсир ёрдамида келтириб чиқарилган фазавий ўзгаришлар асосида янги экспериментал натижалар олиб, мавжуд бўлган “магнитли мавж” назариясини тадқиқ қилиш натижасида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Магнитооптик усул ёрдамида $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ кристалли модуляцияланган магнитли структурасидаги ферро - ва антиферромагнетизм локал векторларининг фазовий ориентацияси аниқланди. Тадқиқ этилган кристаллнинг модуляцияланган магнитли структураси базисли текисликда чизиқли кутбланган спинли тўлқин кўринишга эга эканлиги кўрсатилиб, унда магнитланганлик йўналиши бўйлаб силжиганда магнит майдони вектори йўналиши яқинида ферромагнетизм векторида осциляцияланади. Магнит майдони кучланганлиги ва/ёки ҳарорат ошганда ферромагнетизм векторининг азимути осциляция амплитудаси камаяди.

2. Ушбу кучсиз ферромагнетикнинг бир жинсли магнит ҳолатдан модуляцияланган ҳолатга фазавий ўтиш тури аниқланди ва бир жинсли бўлмаган магнитли фазасининг турғун мавжуд бўлиш соҳасини аниқловчи H - T магнитли фазавий диаграммаси олинди.

3. Модуляцияланган магнитли структуранинг мавжуд бўлиш соҳасида $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ нинг техник магнитланиш жараёни ушбу кристаллда магнитооптик эффектларнинг ҳарорат ва майдонга монотон бўлмаган характерини шартловчи магнитли тартиб амплитуда ва даври қийматларининг бир вақтнинг ўзида сакрашсимон ўзгариши йўли билан амалга ошиши кўрсатилди.

4. Тадқиқ этилган кристаллнинг магнит ҳолатига ёруғлик таъсири даражаси ёритиш давомийлигининг ҳамда ёритилиш вақтидаги ферромагнетизм векторининг ориентациясига боғлиқлиги қайд этилди.

5. Кучсиз ферромагнетикнинг фотосезгирлик модели таклиф этилди. $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ да қайд этилган фотоиндукцияланган эффектлар қонуниятлари унинг локал магнит ва магнитооптик хоссаларини ташқи ёритилганлик ва магнит майдонининг биргаликдаги таъсирида бошқариш мумкинлигини кўрсатди.

6. Фойдаланилган назарий модел $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ ни модуляцияланган магнитли фазасини ўрганишда олинган барча экспериментал натижаларни биргаликда қарама-қаршиликсиз (сифат даражада) ифолаши мумкинлиги кўрсатилди. Диссертацияда олинган натижаларнинг муҳокамаси маълум бўлган «магнитли мавж» назарияси доирасида олиб борилди.

7. $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ да бўладиган модуляцияланган магнитли ҳолатга фазавий ўтишини ифодаловчи модель таклиф этилиб, кристалл базисли текислигида қўшимча бир жинсли бўлмаган магнитокристаллик анизотропия бўлишини, кристалл панжаранинг локал эластик деформацияси билан боғлиқ қўшилмали ва матрицали ионлар ўлчамларининг фарқи натижасида ҳосил бўлади.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.29.08.2017. FM.02.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ
ПРИ САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

БУХАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФАЙЗИЕВ ШАХОБИДДИН ШАВКАТОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДУЛИРОВАННОЙ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ
В РОМБОЭДРИЧЕСКОМ СЛАБОМ ФЕРРОМАГНЕТИКЕ $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$**

01.04.09 – Физика магнитных явлений

**АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Самарканд – 2018

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2017.2.PhD/FM76.

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: **Астанов Салих Хусенович**
доктор физико-математических наук, профессор

Салахитдинова Майсара Камолидиновна
кандидат физико-математических наук, доцент

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

Защита диссертации состоится « ____ » _____ 2018 г. в ____ часов на заседании ученого совета PhD.29.08.2017.FM.02.04 при Самаркандском государственном университете. (Адрес: 140104, г. Самарканд, Университетский бульвар, 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 бульвар, 15. Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40.

Автореферат диссертации разослан « __ » _____ 2018 г.
(протокол рассылки № _____ от « __ » _____ 2018 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 управление модулированными магнитными структурами антиферромагнитных диэлектриков, предназначенных для применения в компьютерных и телекоммуникационных системах, робототехнике. В этом аспекте с целью воздействия на доменную структуру проведение фундаментальных исследований по выявлению механизмов формирования магнитных характеристик и физических процессов в слабых ферромагнетиках является одной из важнейших задач.

Сегодняшнее время в мире внимание уделяется проблемам изменения и управления модулированной магнитной структурой антиферромагнетиков под воздействием внешних факторов. В тоже время требуют изучения следующие аспекты: изучение изменения модулированной магнитной структуры при ориентационном фазовом переходе; магнитооптических характеристик при изменении доменной структуры; механизмов, которые приводят к модуляции магнитного порядка кристалла, что указывает на актуальность темы данной диссертации.

В нашей Республике уделяется большое внимание развитию науки, в частности, применению и изучению магнитооптических свойств и воздействию на доменную структуру магнетиков. В этом направлении в изучении магнитных свойств, магнитооптических характеристик и доменных структур слабых антиферромагнетиков, 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 внимание на разработку эффективных механизмов внедрения достижений научных исследований, в отрасль микроэлектротехники путем применения результатов исследований физических процессов протекающих в полупроводниковых приборах.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в 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 с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики. Исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан: ПФИ-2 - «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

Степень изученности проблемы. В настоящее время исследование магнитооптических свойств и изменения модулированных магнитных структур слабых ферромагнетиков является актуальной задачей физики магнитных явлений. Вклад в это направление внесли такие ученые как С.В.Вонсовский, К.П.Белов, Г.С.Кринчик, А.К.Звездин. На сегодняшний день наряду с общими чертами поведения доменных структур, модулированные магнитные системы в зависимости от физической природы индуцирующих их причин имеют некоторые специфические различия.

Следует отметить, что учеными из Узбекистана К.М.Мукимовым, 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 модулированных магнитных структур под действием внешних факторов, показывает, что в достаточной мере не проведены исследования в этой области. Не проведены систематические исследования фазовых переходов, возникающих под действием магнитного поля, дополнительной засветки или температуры на слабые антиферромагнетики.

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: Ф-2.1.54 «Исследование квантовых процессов в сверхпроводящих материалах и магнитных диэлектриках» (2003-2007 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 влиянию температуры и оптической засветки на условия возникновения и параметры модулированной магнитной структуры кристалла $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$, а также определение типа наблюдаемого фазового перехода и структуры модулированного магнитного состояния этого слабого ферромагнетика.

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

выполнить экспериментальные исследования температурной зависимости пространственного периода и условий существования модулированной магнитной фазы $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$;

провести экспериментальные исследования магнитных и магнитооптических свойств кристалла $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$, находящегося в модулированной магнитной фазе;

определить пространственную ориентацию локального вектора антиферромагнетизма в модулированной магнитной фазе $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$;

провести исследования влияния внешней засветки на ММС кристалла $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$;

выполнить интерпретацию полученных результатов и уточнить

представления существующей теории модулированного магнитного состояния легкоплоскостных антиферромагнетиков.

Объектами исследования являются монокристаллы FeVO_3 и допированные магнием монокристаллы $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ со слабым ферромагнетизмом.

Предметом исследования являются фазовый переход кристалла из однородного магнитного состояния в пространственно модулированное, а также параметры и структуры, реализующиеся при этом фазовом превращении.

Методы исследований. В качестве основного метода исследования модулированной магнитной структуры кристаллов $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ использовалась магнитооптическая визуализация доменной структуры этих кристаллов, а также ее эволюции под действием температуры, внешнего магнитного поля и оптической засветки.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые определено, что фазовый переход в процессе намагничивания легкоплоскостного слабого ферромагнетика $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ является ориентационным фазовым переходом и структура модулированного магнитного состояния этого кристалла;

впервые экспериментально определена магнитная фазовая диаграмма $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$, устанавливающая границы существования однородного и модулированного магнитного состояния в этом кристалле;

определено, что степень светового воздействия на параметры и условия существования ММС $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ существенно зависит как от длительности засветки, так и от ориентации вектора антиферромагнетизма в момент засветки;

на основе теории «магнитной ряби» выполнено теоретическое описание выявленных закономерностей перехода $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ в модулированное магнитное состояние и определены основные физические причины, ответственные за пространственную модуляцию магнитного порядка этого кристалла.

Практические результаты исследования заключаются в том, что на основе экспериментов предложена модель реализующегося в $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ фазового перехода в модулированное магнитное состояние, предполагающая наличие в базисной плоскости кристалла дополнительной неоднородной магнитокристаллической анизотропии, связанной с локальными упругими деформациями кристаллической решетки.

определен, что переход кристалла в модулированное магнитное состояние приводит к существенному повышению его основных магнитных характеристик (коэрцитивной силы, начальной магнитной восприимчивости, формы петли магнитного гистерезиса);

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 с общефизическим представлением и имеющимся литературным данным.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость исследований заключается в том, что полученные при изучении нового типа магнитного упорядочения легкоплоскостного слабого ферромагнетика экспериментальные результаты расширяют физические представления об основных механизмах, приводящих к пространственной модуляции магнитного порядка этого класса магнетиков.

Практическая значимость работы состоит в том, что выявленные результаты демонстрируют возможность управления локальными магнитными и магнитооптическими свойствами $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ слабым магнитным полем, а также совместным действием внешней засветки и поля H , и могут быть использованы при разработке различных приборов магнитной микроэлектроники, в частности, устройств фотомагнитной записи информации.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных в работе результатов ориентационных фазовых переходов при изменении доменной структуры ромбоэдрических ферромагнетиков при спонтанном фазовом переходе и под воздействием двусосных напряжений:

предложенная модель на основе магнитооптических свойств и изменения доменной структуры реализующегося в $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ фазового перехода в модулированное состояние использована для изучения напряженных состояний конструктивных элементов (Институт машиностроения, Россия, справка от 3 мая 2018 года № 20-01-752). Применение этих научных результатов исследований позволяет анализировать зависимость направления напряжений на напряженные состояния конструктивных элементов;

полученная фазовая диаграмма $H - T$ устанавливающая возникновение модулированного магнитного состояния, использована в фундаментальном гранте Ф-2-06 «Магнитные ориентационные фазовые переходы в редкоземельных ферритах-гранатах» для разработки модели (2011-2016 гг.). (Справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан от 26 февраля 2018 года № 89-03-872). Использование научных результатов позволило изучить зависимость параметров модулированной магнитной структуры от температуры и магнитного поля.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 9 международных и 12 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 22 научных трудах, из них 5 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы. Текст диссертации изложен на 122 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, 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. В ней представлены различные типы модулированных магнитных структур и существующие теоретические подходы для их описания; кристаллическая, магнитная и доменная структуры бората железа и его основные магнитные, оптические, магнитооптические и фотомагнитные свойства. Дан краткий обзор экспериментальных и теоретических работ по этим вопросам.

Во второй главе **«Экспериментальная методика исследования магнитной неоднородности ромбоэдрических слабых ферромагнетиков и образцы»** приводится описание используемых образцов, экспериментальных установок и магнитооптической методики исследования пространственной магнитной неоднородности легкоплоскостных слабых ферромагнетиков.

В работе использовались монокристаллы $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ (содержание Mg составляло $\sim 0,1\%$ в весовом отношении к ионам Fe), выращенные методом спонтанной кристаллизации из раствора в расплаве. Образцы имели вид плоско - параллельных пластинок толщиной $\sim 50 \div 60$ мкм с поперечными размерами 3×3 мм², развитые поверхности которых совпадали с базисной плоскостью (111) (с плоскостью легкого намагничивания). Поверхности исследуемых образцов имели достаточно высокое оптическое качество и не подвергались какой – либо механической обработке.

Сведения о магнитном состоянии образца извлекались из наблюдения его доменной структуры (ДС) магнитооптическим методом. Основу экспериментальной установки составил металлографический микроскоп «Метам Р – 1». Наблюдение ДС осуществлялось «на просвет» в окне максимальной оптической прозрачности бората железа (в области длин волн (0,5 мкм) при небольшом (близким, но не равным нулю) угле падения света на плоскость образца (свет распространялся вблизи гексагональной оси C_3) в практически скрещенной геометрии осей пропускания поляризатора и анализатора. Магнитооптическое изображение магнитных неоднородностей образца фиксировалось цифровой фотокамерой, состыкованной с компьютером.

Образцы размещались в оптическом криостате, позволяющем проводить исследования в температурном интервале $80 \div 290$ К. Криостат с образцом

монтировался на голографическом столике, позволяющем осуществлять плавное автоматическое однокоординатное перемещение криостата в фокальной плоскости микроскопа.

Исследования полевой зависимости эффекта Фарадея $F(H)$ при квазистатическом режиме намагничивания были выполнены по стандартной поляриметрической методике с использованием модуляции интенсивности светового потока за счет «покачивания» его плоскости поляризации при помощи ячейки Фарадея. При измерениях начальной магнитооптической восприимчивости в плоскости образца прикладывалось слабое переменное (изменяющееся по гармоническому закону) магнитное поле с амплитудой $h \approx 0,1 \div 0,3$ Эи частотой $f = 25 \div 95$ Гц. В этих экспериментах измерялась величина отношения $\Delta I/I \propto \partial F/\partial H$, где ΔI и I – соответственно переменная и постоянная составляющие интенсивности света, прошедшего систему поляризатор – образец – анализатор.

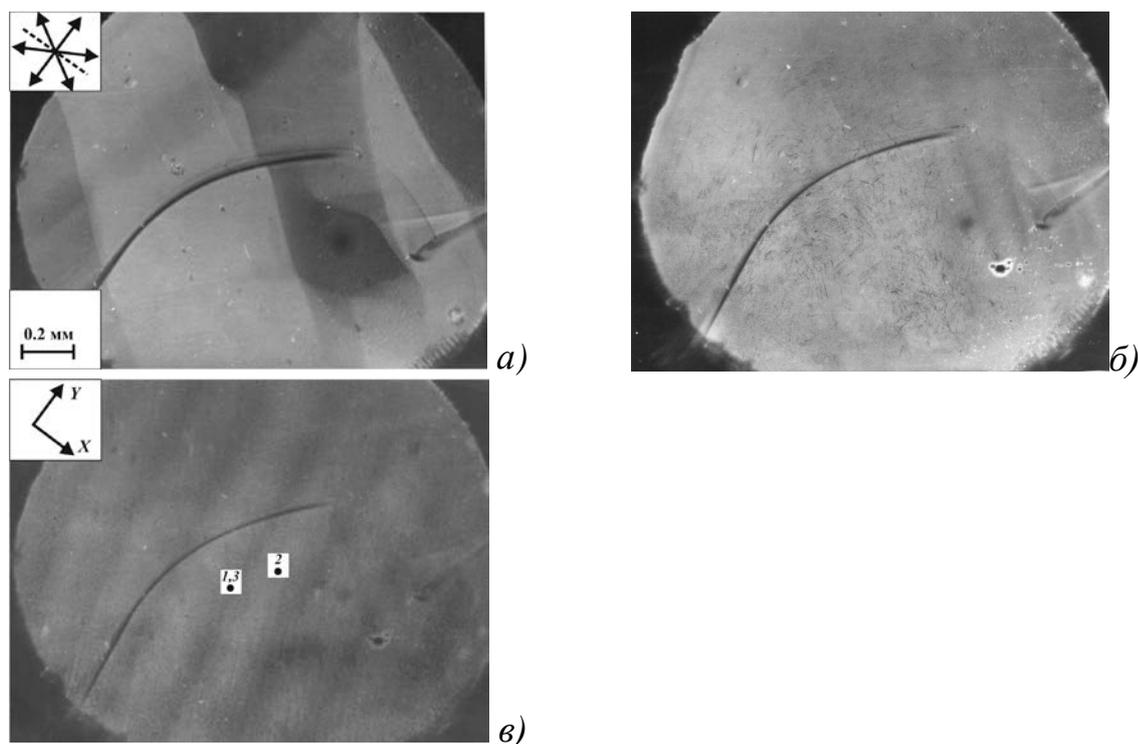
Хорошо известно, что магнитооптическая анизотропия существенно зависит как от ориентации векторов ферро – \mathbf{m} и/или антиферромагнетизма \mathbf{l} (по определению $\mathbf{m}(\mathbf{l})$ в кристалле, так и от ориентации плоскости поляризации зондирующего кристалл света. Поэтому для уточнения магнитной структуры $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ (для определения изменения пространственной ориентации векторов \mathbf{m} и \mathbf{l} в процессе намагничивания кристалла) кроме перечисленных выше линейно зависящих от вектора намагниченности M магнитооптических эффектов исследовался четный по намагниченности магнитооптический эффект – магнитное линейное двулучепреломление (МЛД), определяющееся перпендикулярной по отношению к световому лучу составляющей вектора антиферромагнетизма кристалла. Исследования МЛД проводились по широко известной методике фазовой компенсации (метод Сенармона) с применением модуляции плоскости поляризации света, падающего на фотоприемник.

Однородное магнитное поле напряженностью $H \leq 100$ Э, используемое для намагничивания кристалла, создавалось двумя парами скрещенных катушек Гельмгольца и во всех экспериментах ориентировалось в плоскости образца. В качестве фотоприемника использовался фотоумножитель (ФЭУ – 62 или ФЭУ – 79), который монтировался в окулярное гнездо микроскопа; в качестве источников света – лампа накаливания или He-Ne лазер ЛГ – 126. В фотомагнитных экспериментах образец дополнительно облучался сфокусированным на его поверхность потоком неполяризованного белого света интенсивностью $\sim 5 \times 10^{-2}$ Вт/см² (источником света служила галогеновая лампа КГМ12 – 100).

В третьей главе «**Модулированная магнитная структура ромбоэдрического слабого ферромагнетика $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$** » приведены результаты экспериментальных исследований температурной и полевой зависимостей основных параметров ММС кристалла $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$, а также влияния модуляции магнитного порядка кристалла на его магнитные и магнитооптические свойства. Здесь же приводятся экспериментальные данные, полученные при исследовании структуры модулированной магнитной фазы $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$, и результаты фотомагнитных экспериментов. В рамках теории «магнитной ряби» проведено теоретическое описание выявленных

закономерностей влияния внешних воздействий на ММС исследованного кристалла.

Для реализации ММС в $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ были воспроизведены условия ее существования, установленные в [1, 3]: образец охлаждался до $T < T_c \approx 130$ К и намагничивался в плоскости (111) вдоль направления, перпендикулярного одной из осей C_2 . На рис. 1а представлено изображение ДС $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$, наблюдаемое при $T = 290$ К в размагниченном состоянии образца, а на рис. 1б, в – приведены изображения того же образца, полученные при $T = 80$ К при различной напряженности магнитного поля ($\mathbf{H} \perp C_2$).

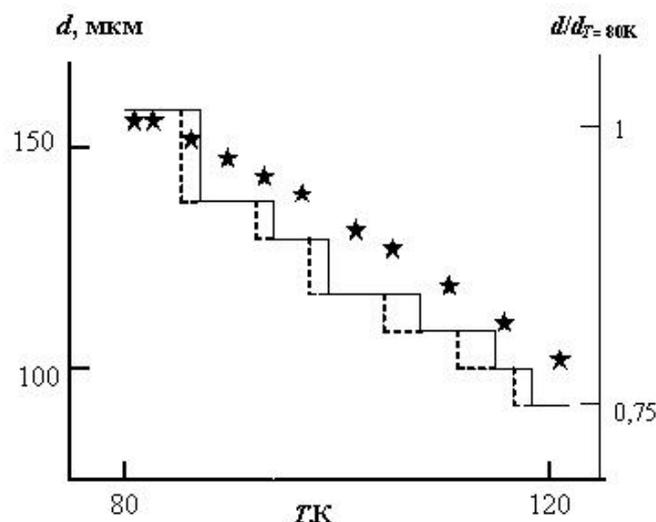


На вставках: (а) – двойные стрелки – направления осей C_2 , пунктирная линия – направление намагничивания; (в) – стрелки – ориентация осей лабораторной системы координат, точки – положения сфокусированного лазерного луча, при которых были получены соответствующие указанным над точками цифрам ориентационные зависимости МЛД, представленные на рис. 5.

Рис. 1. Вид доменной структуры (а) и изображения кристалла $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$, полученные при $H = 4,5$ (б) и 6 Э (в) ($T = 80$ К, $\mathbf{H} \perp Y$).

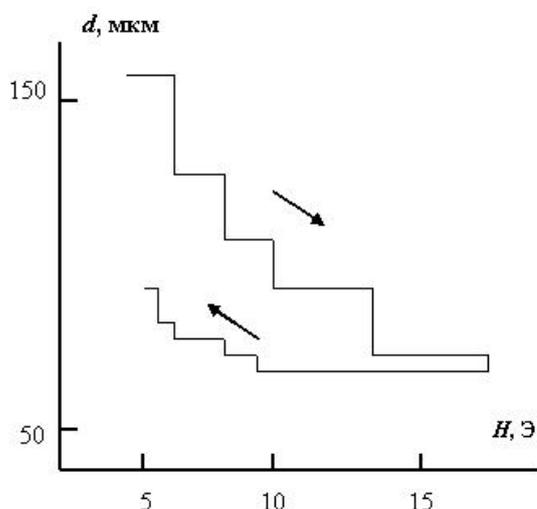
Как видно из рис. 1а, в размагниченном состоянии образец имеет обычную двухслойную 180 – ти градусную ДС с ориентацией доменных границ вблизи направления одной из осей C_2 . Намагничивание образца в плоскости (111) происходило обычным образом: ширина доменов, вектор \mathbf{m} в которых составлял острый угол с вектором \mathbf{H} , увеличивалась за счет доменов с противоположной ориентацией \mathbf{m} . Однако ниже $T \approx 130$ К, также как и в [1, 3], при намагничивании образца в направлении, перпендикулярном оси C_2 , сначала при $H \approx 4,5$ Э изображения доменов пропадают (кристалл монодоменизируется) (рис. 1 б), а затем с ростом H на изображении образца появляется квазипериодическая система различающихся контрастом полос (рис. 1 в),

которая связывалась в [1, 3] с переходом кристалла в модулированное магнитное состояние.



Сплошная ломанная линия – «незасвеченный» образец, пунктирная ломанная линия – образец был предварительно засвечен неполяризованным белым светом при $H = 0$ в течение 10 мин.

Рис. 2. Температурная зависимость пространственного периода модулированной магнитной структуры $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$, полученная при $H = 6,5$ Э.



Обозначения те же, что и на рис. 2. Стрелки указывают направление развертки магнитного поля.

Рис. 3. Полевая зависимость пространственного периода модулированной магнитной структуры $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$, полученная при $T = 80$ К.

Аналогичные системы полос появляются на изображении кристалла и при его намагничивании вблизи перпендикуляров к двум другим осям C_2 . При отклонении вектора \mathbf{H} от этих направлений на угол $\approx 10^\circ$ полосы структуры видоизменяются: меняется их пространственный период, они смещаются, но их направление в плоскости кристалла (совпадающее с той из C_2 – осей, направление которой перпендикулярно приложенному магнитному полю) и контраст изображения сохраняются. Дальнейшее отклонение поля от этих направлений приводит к скачкообразному исчезновению системы полос на изображении образца.

Возникающая на изображении $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ система полос существует в некотором зависящем от T интервале намагничивающего поля и исчезает при

достижении полем критического значения H_c , при этом с ростом H и/или T наблюдается уменьшение контраста между соседними темными и светлыми полосами. Период системы полос d (среднее расстояние между двумя соседними светлыми или темными полосами) изменяется при изменении T и H путем скачкообразного изменения числа наблюдаемых полос на регистрируемой длине, что на графиках зависимостей $d(T)$ и $d(H)$, представленных на рис. 2, рис. 3 показано в виде ступенек. Характерно, что в то время как зависимость $d(H)$ имеет заметный гистерезис на обратном ходе намагничивания средний период структуры оказывается меньше периода, наблюдаемого при увеличении H от нуля), зависимости $d(T)$, полученные при нагреве и охлаждении образца, различаются слабо.

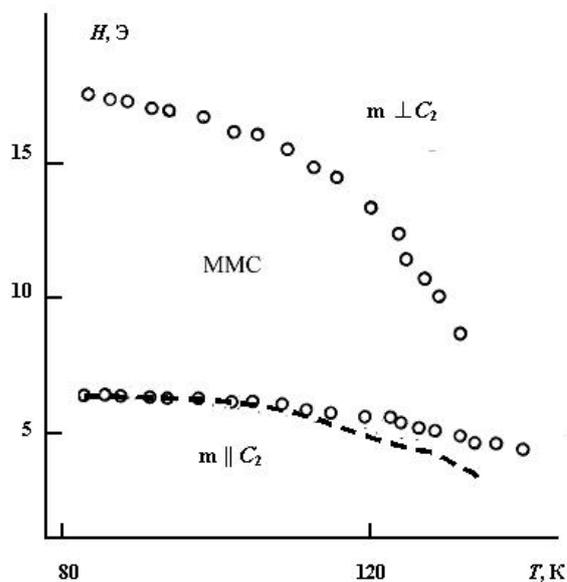
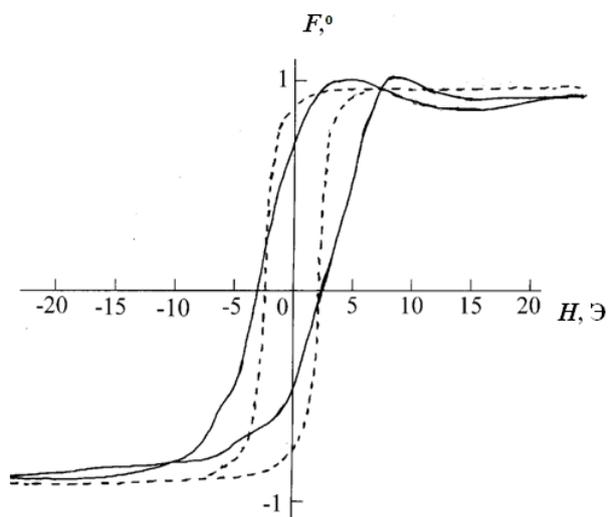


Рис. 4. Фазовая $H - T$ – диаграмма магнитного состояния кристалла $FeVO_3:Mg$.



пунктир – $H \parallel C_2$; сплошная линия – $H \perp C_2$.

Рис. 5. Полевые зависимости угла поворота плоскости поляризации прошедшего исследованный кристалл света, полученные при $T = 80$ К при двух ориентациях H

На рис. 4 приведена экспериментальная фазовая $H - T$ диаграмма, показывающая границы существования однородного и неоднородного магнитного состояния $FeVO_3:Mg$. Значения температуры и интервалы полей (H , задающие область существования MMC, определялись путем прямого визуального наблюдения за зарождением и исчезновением системы полос. Как

видно из рис. 4, модулированное магнитное состояние является промежуточным между двумя фазами кристалла с однородной намагниченностью соответственно с $\mathbf{m} \parallel C_2$ (I) и с $\mathbf{m} \parallel \mathbf{H} \perp C_2$ (II). Причем из характера зависимостей $d(H, T)$ (при достижении температуры и напряженности магнитного поля своих критических значений величины периода d изменяются скачком) можно заключить, что оба перехода $I \leftrightarrow \text{ММС}$ и $II \leftrightarrow \text{ММС}$ – фазовые превращения первого рода.

Как показали исследования, ММС, возникающая в кристалле, существенно влияла на магнитооптическую восприимчивость и полевую зависимость эффекта Фарадея. В качестве примера на рис. 5 показаны полевые зависимости фарадеевского вращения, полученные при $T < T_c$ при двух ориентациях намагничивающего поля. Как видно из рис. 5, кривая $F(H)$, полученная при $T = 80$ К при $\mathbf{H} \perp C_2$, в отличие от аналогичной кривой, наблюдаемой при $\mathbf{H} \parallel C_2$, имеет (помимо заметно большей коэрцитивности) гистерезис значений F в области полей существования ММС ($4,5 \leq H \leq 17$ Э), а также излом вблизи $H = 0$ (при $T > 140$ К вид зависимости $F(H)$ не зависит от ориентации \mathbf{H} в базисной плоскости кристалла).

В ромбоэдрических слабых ферромагнетиках при распространении света вдоль оптической оси (оси C_3) величина МЛД в точке на плоскости (111) с координатами (x, y) может быть представлена в виде

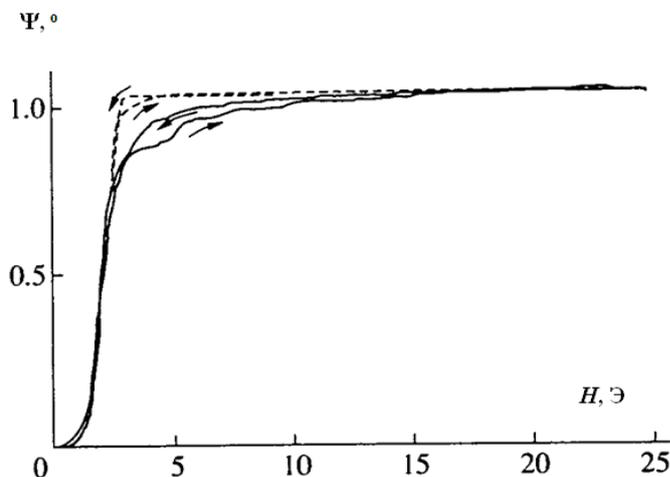
$$\begin{aligned} \psi &= \varphi(x, y) \sin 2[\theta - \beta(x, y)]; & (1) \\ \varphi(x, y) &= \varphi_0(a^2 + b^2)^{1/2}; \quad \varphi_0 = 2\pi(n_{\parallel} - n_{\perp})d/\lambda \propto |\mathbf{I}|^2; \\ a &= d^{-1} \int_0^d \cos 2\beta(x, y, z) dz; \quad b = d^{-1} \int_0^d \sin 2\beta(x, y, z) dz; \end{aligned}$$

где β – угол между направлением проекции вектора \mathbf{I} на плоскость (111) и осью У лабораторной системы координат (для определенности примем $\mathbf{Y} \parallel C_2$, см. рис.1); θ – азимут плоскости поляризации падающего на кристалл света относительно той же оси; n_{\parallel} , n_{\perp} – показатели преломления для света с длиной волны λ , линейно поляризованного соответственно вдоль и поперек направления плоскостной компоненты вектора \mathbf{I} ; d – толщина кристалла вдоль оси Z ($\mathbf{Z} \parallel C_3$) (параметры a и b учитывают возможную неоднородность угла β вдоль оси C_3).

Зависимость $\psi(\theta)$ для заданных значений x и y является гармонической функцией, характеризующее направление с начальной фазой β и амплитудой φ , а также модуль антиферромагнитного момента в заданной точке, как следует из (3.1). Соответственно исходя из (3.1) координатная зависимость МЛД дает сведения об ориентации вектора \mathbf{I} в кристалле. При исследованиях ориентационной и координатной зависимостей МЛД лазерное излучение при помощи микроскопа фокусировалось на поверхности образца в пятно диаметром ~ 15 мкм. Учитывая, что пространственный период магнитной неоднородности $\text{FeVO}_3:\text{Mg} \sim 100$ мкм (см. рис.1-3), при этих условиях эксперимента можно рассматривать исследуемый участок поверхности

кристалла как точечный, полагая в пределах площади светового пятна $\beta(x,y) \approx \text{const}$.

Проведенные нами исследования показали, что в температурной области выше температуры перехода кристалла в модулированное магнитное состояние (при $T > T_c$) вид полевой и температурной зависимостей МЛД $\psi(H)$ и $\psi(T)$ практически не менялся при изменении направления вектора H в плоскости (111). В то же время при $T < T_c$ зависимости $\psi(H)$ и $\psi(T)$, наблюдаемые при разной ориентации намагничивающего поля, заметно различались. На рис. 6 показаны «интегральные» (т.е. измеренные при засветке всей поверхности образца) полевые зависимости МЛД исследованного кристалла $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$, полученные при $T = 80 \text{ K}$ при ориентации вектора H вдоль оси $C_2 \parallel Y$ и вдоль перпендикулярного этой оси направления при азимуте поляризатора ($\theta = 45^\circ$). Из сравнения графиков. В соответствие с (3.1) значения $|\psi|$ по величине совпадают в двух направлениях в условиях технического насыщения, при этом для полей $5 \leq H \leq 17 \text{ Э}$ при $H \perp C_2$ в интервале полей существования ММС ход кривых $|\psi|(H)$ существенно отличается.

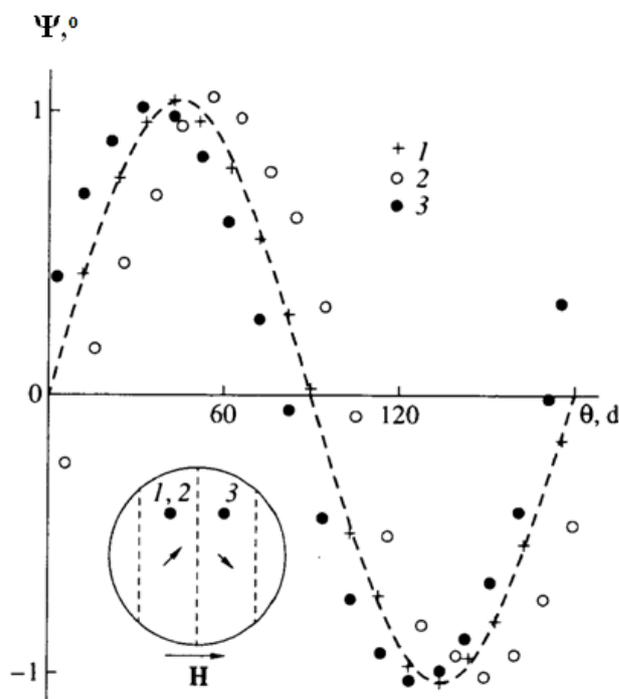


Сплошная линия - $H \perp C_2$, пунктир - $H \parallel C_2$ (стрелками показан ход кривых при перемагничивании кристалла). Время развертки магнитного поля ~ 1 мин.

Рис. 6. Полевая зависимость магнитного линейного двулучепреломления в $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ при $T = 80 \text{ K}$

На рис. 7 представлены «локальные» (свет сфокусирован в разных точках поверхности образца) зависимости МЛД $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ от ориентации плоскости поляризации падающего на кристалл света, измеренные при $T = 80 \text{ K}$ при двух значениях магнитного поля 6 и 50 Э ($H \perp Y$). Из рис. 7 следует, что как в однородном, так и в модулированном магнитном состоянии кристалла экспериментальные зависимости $\psi(\theta)$ хорошо описываются гармоническими функциями от 2θ , амплитуда которых практически не зависит от напряженности поля. Последнее, очевидно, означает, что в ММС намагниченность кристалла однородна по его толщине (т.е. $\beta(z) = \text{const}$), причем вектор I (так же как и в однородной магнитной фазе) не выходит из базисной плоскости (111). Согласно (1), в этом случае экстремальные значения $\psi = \pm \phi_0$ на зависимостях $\psi(\theta)$ в точке (x,y) будут иметь место при $(\theta = \beta \pm 45^\circ)$. Это условие позволяет

непосредственно из приведенных на рис. 7 графиков найти угол β , т.е. определить азимут вектора \mathbf{l} относительно оси Y в заданных точках поверхности образца. Поскольку при измерениях МЛД точки на поверхности кристалла были выбраны в центре визуально наблюдаемых в микроскоп соседних полос различного контраста (рис. 1 в), можно заключить, что в ММС $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ амплитуда угла отклонения вектора \mathbf{l} от оси Y в поле $H = 6 \text{ Э}$ составляет $\approx 10^\circ$.



1 – $H = 50 \text{ Э}$; 2,3 – $H = 6 \text{ Э}$ ($\mathbf{H} \perp \mathbf{Y}$, $T = 80 \text{ К}$). Пунктирная кривая – зависимость $\Psi \propto \sin 2\theta$. Стрелками в овале схематически показано направление локального вектора \mathbf{l} в точках на плоскости образца, отмеченных цифрами 1, 2 и 3.

Рис. 7. МЛД в $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ в зависимости от азимута плоскости поляризации падающего на кристалл света

С учетом этого из (1) следует, что азимут локального вектора антиферромагнетизма в ММС $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ может быть приближенно представлен в виде одномерной зависимости от пространственной координаты

$$\beta = \beta_0 \cos(2\pi x/d), \quad (2)$$

где β_0 – амплитуда отклонения вектора \mathbf{l} от оси $C_2 \perp \mathbf{H}$; d – период магнитной неоднородности, что позволяет представить структуру ММС $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ в виде статичной волны намагниченности, в которой (с учетом малости угла β_0) в выбранной нами системе координат (в которой ось Z совпадает с направлением распространения света, а X – ось – с направлением приложенного поля) компоненты векторов \mathbf{m} и \mathbf{l} имеют вид:

$$l_x = |\mathbf{l}| \sin(\beta_0 \cos kx) \approx |\mathbf{l}| \beta_0 \cos kx; \quad l_y \approx |\mathbf{l}|; \quad l_z = 0; \\ m_x \approx |\mathbf{m}|; \quad m_y = |\mathbf{m}| \sin(\beta_0 \cos kx) \approx |\mathbf{m}| \beta_0 \cos kx; \quad m_z = 0; \quad (3)$$

где \mathbf{k} – волновой вектор структуры ($|\mathbf{k}| = 2\pi/d$, $\mathbf{k} \parallel \mathbf{X}$).

Известно, что обычно световое воздействие лишь незначительно изменяет различные магнитные характеристики (коэрцитивную силу, восприимчивость, остаточную намагниченность и т.п.) магнетиков. Однако борат железа – один из небольшого числа известных в настоящее время

магнитоупорядоченных кристаллов, у которых под действием света появляются новые, отсутствующие без дополнительной засветки свойства. В частности в FeVO_3 , допированном ионами Ni , при засветке неполяризованным белым светом возникает пространственно модулированная магнитная структура [4]. Из предложенной в [4] теории фотоиндуцированной ММС $\text{FeVO}_3:\text{Ni}$ следует, что к ее возбуждению приводит магнитоакустическое взаимодействие между комплексами, образованными матричными ионами Fe и примесными ионами Ni , которое в отсутствии засветки незначительно, но усиливается при поглощении света кристаллом. Эта теория в принципе допускает возникновение ММС в допированном примесью FeVO_3 и без дополнительной засветки, однако световое воздействие должно влиять на параметры модуляции магнитного порядка кристалла. Для обнаружения этого воздействия на параметры ММС $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ были проведены фотомагнитные эксперименты, в которых образец подвергался дополнительному световому облучению. В этих экспериментах образец охлаждался до $T = 80 \text{ K}$ и дополнительно облучался сфокусированным на его поверхность потоком неполяризованного белого света интенсивностью $\sim 5 \times 10^{-2} \text{ Вт/см}^2$; после выдержки образца в течение некоторого времени под световым потоком дополнительная засветка выключалась и проводились визуальные наблюдения ДС и измерения эффекта Фарадея.

Как показали эксперименты, дополнительная засветка образца неполяризованным белым светом не приводила к наблюдаемому изменению ДС или вида системы полос, уже существующей на изображении образца при $\mathbf{H} \perp \mathbf{C}_2 \parallel \mathbf{Y}$. Перемагничивание «засвеченного» образца вдоль оси X так же не выявило какого – либо воздействия света на форму петли гистерезиса. Однако, при исследованиях полевой зависимости эффекта Фарадея при $\mathbf{H} \parallel \mathbf{Y}$ было установлено, что длительная засветка образца, находящегося в размагниченном состоянии, приводит к увеличению ширины петли магнитного гистерезиса (росту коэрцитивной силы H_k). Причем, заметное изменение (превышающее ошибку эксперимента $\sim 0,02 \text{ Э}$) ширины петли гистерезиса эффекта Фарадея наблюдалось при длительности засветки $\tau > 2 \text{ мин}$, а рост величины H_k происходил до $\tau \approx 10 \text{ мин}$, после чего увеличение времени предварительной засветки образца практически не влияло на вид кривой $F(H)$. Кроме этого было установлено, что предварительная засветка образца (при $T = 80 \text{ K}$, $H = 0$) изменяла период и условия существования ММС, реализующейся в кристалле при его намагничивании вдоль трудных осей, ориентированных под углом 30° к оси Y : изменялся интервал полей, в котором наблюдается система полос, а ее период увеличивался по сравнению со значением d , наблюдаемым на «незасвеченном» образце, при этом скачкообразный характер зависимостей $d(H)$ и $d(T)$ сохраняется (см. рис. 2, 3).

Из теории «магнитной ряби» следует, что период магнитной неоднородности легкоплоскостного магнетика определяется так [5]:

$$d = 2 \pi [2 A / (MH - 2 K)]^{1/2}, \quad (4)$$

где A – обменная константа; M – спонтанная намагниченность, K – константа

анизотропии вдоль оси C_2 .

Согласно (4), ММС возникает при условии:

$$H > H_0 = 2K/M, \quad (5)$$

которое позволяет оценить константу гексагональной анизотропии $FeVO_3:Mg$. Используя $H_0 = 4,5 \text{ Э}$ – значение поля, при котором появляется ММС, и известную величину M ($T = 80K$) $\approx 17 \text{ Гс}$, из (5) находим $K \approx 40 \text{ эрг/см}^3$ (по данным различных исследований в беспримесном $FeVO_3$ при азотной температуре величина K колеблется от 8 до 13 эрг/см³). К сожалению, гистерезис значений d , наблюдаемый при перемагничивании кристалла $FeVO_3:Mg$ (см. рис. 2), не позволяет непосредственно сравнить (4) с экспериментальной зависимостью $d(H)$. Однако, из структуры формулы (4) видно, что вначале при $H \geq H_0$ зависимость $d(H)$ имеет резкий спад, а затем при $H > 2H_0$ период модуляции меняется слабо, что коррелирует с данными эксперимента.

Подставляя в (4) известное для бората железа значение $A \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ эрг/см}$, $K = 40 \text{ эрг/см}^3$ и значение H из области полей, где D слабо зависит от напряженности поля (для определенности, $H = 15 \text{ Э}$), находим $d \approx 10 \text{ мкм}$, что примерно в пять раз меньше наблюдаемого периода ММС. Следовательно, можно заключить, что хотя формула (4) достаточно хорошо (без учета эффектов гистерезиса и пининга) описывает экспериментально наблюдаемое изменение периода ММС, рассчитанная на ее основе величина d согласуется с данными эксперимента лишь по порядку величины.

Формула (4) также позволяет объяснить результаты, полученные при исследованиях влияния света на ММС $FeVO_3:Mg$. Если предположить, что в условиях наших экспериментов рост магнитной анизотропии происходит вдоль направления, в котором был ориентирован вектор \mathbf{m} при засветке кристалла, тогда при облучении кристалла светом при $H = 0$ должна увеличиться константа K вдоль оси $C_2 \parallel Y$, поэтому при ориентации \mathbf{H} под углом 30° к оси Y , в соответствии с (2), должно наблюдаться увеличение периода ММС по сравнению с величиной d , характерной для «незасвеченного» кристалла, что соответствует экспериментальным результатам (см. рис. 2, 3). Если же намагничивать «засвеченный» при $H = 0$ образец в направлении оси X , то поскольку засветка не изменила величину K вдоль ближайшей к направлению \mathbf{H} оси C_2 , периоды систем полос, возникающих при $\mathbf{H} \parallel X$ на изображениях «засвеченного» и «незасвеченного» кристалла, не должны различаться (что и наблюдается экспериментально). Так же засветка не должна оказывать влияние на параметры уже существующей ММС кристалла. Действительно, в ММС $FeVO_3:Mg$ локальный вектор \mathbf{m} осциллирует около вектора \mathbf{H} ($\mathbf{H} \perp C_2$) при смещении в легкой плоскости вдоль направления намагничивания (см. формулы (2), (3)). Следовательно, облучение $FeVO_3:Mg$, находящегося в модулированном магнитном состоянии, должно приводить (в силу отмеченной выше связи фотостимулированного роста анизотропии и ориентации \mathbf{m}) к возникновению незначительной (по сравнению с кристаллографической) локальной одноосной анизотропии, азимут оси которой будет периодически

отклоняться от направления \mathbf{H} с периодом модуляции направления вектора \mathbf{m} в ММС кристалла, т.е. дополнительная засветка стабилизирует изначальную модуляцию магнитного порядка кристалла, не изменяя ее периода (что соответствует результатам наблюдений).

Очевидно, что при намагничивании $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ вдоль трудной оси фотоиндуцированный рост константы K приведет к тому, что для отклонения вектора \mathbf{m} в сторону \mathbf{H} на заданный угол требуется поле большей напряженности, с чем и связано наблюдаемое в эксперименте увеличение значений H_1 и H_c в «засвеченном» кристалле (см. рис. 2, 3).

Таким образом, полученные результаты демонстрируют возможность управления локальными магнитными и магнитооптическими свойствами кристалла $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ совместным действием внешней засветки и поля \mathbf{H} . Поскольку фотоиндуцированное изменение параметров магнитной неоднородности кристалла сохраняется при низкой температуре в течении достаточно продолжительного времени (при $T = 80 \text{ K}$ – в течении ~ 60 мин.), обнаруженный эффект может представлять интерес с точки зрения практического использования, в частности, в системах фотомагнитной записи информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных новых экспериментальных данных о спонтанных и индуцированных внешними воздействиями фазовых переходах в магнитоупорядоченных кристаллах, существующей термодинамической теории магнитных ориентационных фазовых переходов можно сделать следующие выводы:

1. Определена пространственная ориентация локальных векторов ферро – и антиферромагнетизма в модулированной магнитной структуре кристалла $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ магнитооптическим методом. Показано, что модулированное магнитное состояние исследованного кристалла имеет вид спиновой волны, линейно поляризованной в базисной плоскости, в которой вектор ферромагнетизма осциллирует около направления вектора магнитного поля при смещении вдоль направления намагничивания. Амплитуда осцилляций азимута вектора ферромагнетизма уменьшается при росте напряженности магнитного поля и/или температуры.

2. Определен тип фазового перехода из однородного магнитного состояния в модулированное и получена магнитная фазовая $H - T$ диаграмма, определяющая область устойчивого существования неоднородной магнитной фазы этого слабого ферромагнетика.

3. Показано, что процесс технического намагничивания $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ в области существования модулированной магнитной структуры осуществляется путем одновременного скачкообразного изменения величины периода и амплитуды модуляции магнитного порядка, обуславливающего немонотонный характер полевой и температурной зависимостей магнитооптических эффектов

в этом кристалле.

4. Обнаружено, что степень светового воздействия на магнитное состояние исследованного кристалла зависит от длительности облучения и от ориентации вектора ферромагнетизма во время засветки.

5. Предложена модель фоточувствительности слабого ферромагнетика. Выявленные закономерности фотоиндуцированных эффектов в $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ показали возможность управления его локальными магнитными и магнитооптическими свойствами совместным действием внешней засветки и магнитного поля.

6. Показано, что используемая теоретическая модель позволяет непротиворечиво описать (на качественном уровне) всю совокупность экспериментальных результатов, полученных при изучении модулированной магнитной фазы кристалла $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$. Обсуждение полученных в работе результатов проведено в рамках известной теории «магнитной ряби».

7. Предложена модель реализующегося в $\text{FeVO}_3:\text{Mg}$ фазового перехода в модулированное магнитное состояние, предполагающая наличие в базисной плоскости кристалла дополнительной неоднородной магнитокристаллической анизотропии, связанной с локальными упругими деформациями кристаллической решетки, вызванными различием размеров примесных и матричных ионов.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD OF THE SCIENTIFIC DEGREE
DOCTOR OF PHILOSOPHY PhD.29.08.2017. FM.02.04
SAMARKAND STATE UNIVERSITY
BUKHARA STATE UNIVERSITY**

FAYZIYEV SHAKHOBIDDIN SHAVKATOVICH

**INVESTIGATION OF A MODULATED MAGNETIC STRUCTURE IN
A RHOMBOHEDRAL WEAK FERROMAGNET FeBO_3 : Mg**

01.04.09 – Physics of magnet phenomena

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

Samarkand – 2018 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 M the Republic of Uzbekistan under number B2017.2.PhD/FM76.

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: **Astanov Salikh Khusenovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Salakhitdinova Maysara Kamolidinovna
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, docent

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

Dissertation defense will be held on « ____ » _____ 2018 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 « ____ » _____ 2018 year
(Mailing report № _____ on « ____ » _____ 2018 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 the effect of temperature and optical illumination on the conditions of formation and parameters of the modulated magnetic structure of the $\text{FeBO}_3:\text{Mg}$ crystal, as well as determining the type of the observed phase transition and the structure of the modulated magnetic state of this weak ferromagnet..

The objects of the research work are single crystals of FeBO_3 and magnesium doped $\text{FeBO}_3:\text{Mg}$ single crystals with weak ferromagnetism.

Scientific novelty of the research work is as follows:

For the first time it was determined that the the phase transition in the process of magnetization of an easy-plane weak ferromagnet $\text{FeBO}_3:\text{Mg}$ is an orientational phase transition and the structure of the modulated magnetic state of this crystal;

For the first time, the magnetic phase diagram of $\text{FeBO}_3:\text{Mg}$ was established experimentally, which establishes the existence boundaries for a homogeneous and modulated magnetic state in this crystal;

It is determined that the degree of light influence on the parameters and the conditions for the existence of MMCs $\text{FeBO}_3:\text{Mg}$ essentially depends both on the duration of the exposure and on the orientation of the antiferromagnetism vector at the time of exposure;

on the basis of the theory of "magnetic ripples", a theoretical description of the revealed regularities of the transition of $\text{FeBO}_3:\text{Mg}$ to a modulated magnetic state is carried out, and the main physical causes responsible for the spatial modulation of the magnetic order of this crystal are determined.

Implementation of the research results. On the basis of the results obtained in the work of orientational phase transitions with a change in the domain structure of rhombohedral ferromagnets during a spontaneous phase transition and under the influence of biaxial stresses:

the proposed model based on magneto-optical properties and changes in the domain structure of the phase transition to the modulated state realized in $\text{FeBO}_3:\text{Mg}$ was used to study the strained states of structural elements (certificate of Institute of Mechanical Engineering, Russia, from May 3, 2018 No. 20-01-752). The application of these scientific research results makes it possible to analyze the dependence of the stress direction on the stressed states of structural elements;

the obtained phase diagram $H - T$, which establishes the appearance of a modulated magnetic state, was used in the fundamental grant F-2-06 "Magnetic Orientational Phase Transitions in rare-earth iron garnets" for model development (2011-2016). (Certificate of the Ministry of higher and secondary special education of the Republic of Uzbekistan of February 26, 2018 No. 89-03-872). The use of scientific results made it possible to study the dependence of the parameters of the modulated magnetic structure on the temperature and magnetic field.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references. The text of the dissertation consists of 122 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ

СПИСОКОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Boidedaev S. R., Dzhuraev D. R., Sokolov B. Yu., Faiziev Sh. Sh./ Effect of the Transformation of the magnetic structure of a $\text{FeVO}_3\text{:Mg}$ crystal on its magneto-optical anisotropy. // Optics and Spectroscopy, 2009, Vol. 107 No. 4 -P. 651-654. [№11, Springer, IF=0.716]
2. Бойдедаев С.Р., Джураев Д.Р., Соколов Б.Ю., Файзиев Ш.Ш. /Состояние «магнитной ряби» в слабом ферромагнетике $\text{FeVO}_3\text{:Mg}$. // Узбекский физический журнал. Ташкент: 2009 г., № 5-6, С. 376 – 383. [01.00.00, № 5]
3. Бойдедаев С.Р., Джураев Д.Р., Соколов Б.Ю., Файзиев Ш.Ш. /Структура неоднородной магнитной фазы монокристалла $\text{FeVO}_3\text{:Mg}$.// Прикладная физика. 2010 г., №4, С.39 – 44. [01.00.00, № 41]
4. Джураев Д.Р., Соколов Б.Ю., Файзиев Ш.Ш. /Структура неколлинеарной магнитной фазы ромбоэдрического кристалла $\text{FeVO}_3\text{:Mg}$. // Доклады Академии Наук Республики Узбекистан. Ташкент: 2010 г. №2. С. 36-39. [01.00.00, № 7]
5. D. R. Dzhuraev, B. Yu. Sokolov, and Sh. Sh. Faiziev / Photoinduced changes in the space-modulated magnetic order of a $\text{FeVO}_3\text{:Mg}$ single crystal// Russian Physics Journal, 2011, Vol. 54, №3, -P 382-385. [№11, Springer, IF=0.667]
6. Шарипов М.З., Соколов Б.Ю. Файзиев Ш.Ш., Миржонова Н.Н. / Влияние перестройки магнитной структуры кристалла $\text{FeVO}_3\text{:Mg}$ на его магнитооптическую анизотропию // Наука, техника и образование 2015. № 4 (10), -С. 15-18

II бўлим (II часть; II part)

7. Джураев Д.Р., Соколов Б.Ю., Файзиев Ш.Ш. / Модулированное магнитное состояние в слабом ферромагнетике $\text{FeVO}_3\text{:Mg}$.// Материалы II Республиканской научной конференции «Актуальные проблемы современной физики и астрономии». Қарши 21-май. 2010 г., -С.154-155.
8. Джураев Д.Р., Соколов Б.Ю., Файзиев Ш.Ш./ «Магнитная рябь» в слабом ферромагнетике $\text{FeVO}_3\text{:Mg}$. // IV-Байкальская Международная конференция «Магнитные материалы. новые технологии». Иркутск 2010 г., -С.72-73.
9. Джураев Д.Р., Соколов Б.Ю., Файзиев Ш.Ш. / Неколлинеарная магнитная фаза ромбоэдрического кристалла $\text{FeVO}_3\text{:Mg}$.// IV-Байкальская международная конференция «Магнитные Материалы. Новые Технологии». Иркутск. 2010 г., - С.112-113.
10. Djuraev D.R., Fayziev Sh.Sh., Sokolov B.Yu. / Structure of the incolinear magnetic phase of $\text{FeVO}_3\text{:Mg}$. // The 55th Magnetism and Magnetic Materials Conference. Atlanta, USA. 2010y.

11. Djuraev D.R., Fayziev Sh.Sh., Sokolov B.Yu./ A modulated magnetic state in weak ferromagnet FeBO₃:Mg.//The 55th Magnetism and Magnetic Materials Conference. Atlanta, USA. 2010y.
12. Джураев Д.Р., Соколов Б.Ю., Файзиев Ш.Ш. / «Магнитная рябь» в ромбоэдрическом кристалле FeBO₃:Mg. // Материалы четвертой международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», Ташкент. 2010 г., -С.342-344.
13. Djuraev D.R., Fayziev Sh.Sh., Sokolov B.Yu./ Single crystal FeBO₃:Mg and inhomogeneous magnetic phase.// Moscow International Symposium on Magnetism (MISM -2011). Moscow. 2011 y. -P.216
14. Джураев Д.Р., Миржанова Н.Н., Рахимов Ш.А., Файзиев Ш.Ш. / Ўта ўтказувчанлик физикасининг баъзи масалалари// Тошкент, DIZAYN-PRESS 2012 йил, 173 бет.
15. Джураев Д.Р., Ниязов Л.Н., Соколов Б.Ю., Файзиев Ш., Эргашева Н. / Ориентационные магнитные фазовые переходы феррита содержащих магнетиков //IV международная конференция «Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред». Самарканд. 2013, - С.101-102
16. Djuraev D.R., Niyazov L.N., Fayziev Sh.Sh. / Orientational phase transition into a modulated magnetic state in the some magnetics.// Moscow International Symposium on Magnetism (MISM). Moscow 2014, -P. 805
17. Шарипов М.З., Далмуродова Н.Н., Файзиев Ш.Ш., Халлоқов Ф.К., Олимпур Ф.И. / Особенности кристаллической и магнитной структуры бората железа FeBO₃.//Актуальные проблемы химической технологии Материалы республиканской научно-практической конференции. Бухара. 2014г.,-С. 22-24
18. Файзиев Ш.Ш., Джураева Л.Р./О магнитных свойствах бората железа допированного магнием //Современные инновации в науке и технике сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции. Курск, 2014 г.,-С.264-266
19. Джураев Д.Р., Ниязов Л.Н., Соколов Б.Ю., Файзиев Ш.Ш. / Ориентационный фазовый переход и модулированная магнитная структура монокристалла α – Fe₂O₃:Ga.//«Фундаментальные и прикладные вопросы физики» сборник тезисов докладов республиканской конференции посвященной 100-летию академика. С.А.Азимова, Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз. Ташкент. 2014 г., -С.164-165.
20. Djuraev D.R., Ergasheva M.I., Niyozov L.N., Fayziev Sh.Sh. / Orientatsiyali magnitli fazaviy o'tish va kuchsiz ferromagnetism.//Тошкент, DIZAYN-PRESS 2014 йил, 104 бет.
21. Ниязов Л.Н., Файзиев Ш.Ш./ Модулированная магнитная структура кристалла бората железа допированного магнием/ IV international scientific conference of young researches Proceedings 1 book. – Baku, Azerbaijan: 2016, С. 12-13

Автореферат СамДУ «Илмий ахборотнома» журнали тахририятида тахрирдан ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнлари ўзаро мувофиқлаштирилди.

Босишга рухсат этилди: 04.10.2018 йил
Бичими 60x84 1/16 , «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 3. Адади: 100. Буюртма: № 137.

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

«Садриддин Салим Бухорий» МЧЖ
босмахонасида чоп этилди.

