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

ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ

МАЛИШЕВА МАРИЯ ЕВГЕНИЕВНА

ПАРАМАГНИТ КРИСТАЛЛАРДА НОКРАМЕРС Eu^{3+}, Tb^{3+} ВА Pr^{3+} ИОНЛАРИНИНГ МАГНИТООПТИКАСИ

01.04.05–Оптика

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

Тошкент –2019

УДК: 537.632.4

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

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

Content of the dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences

Малишева Мария Евгениевна
Парамагнит кристалларда нокрамерс Eu^{3+}, Tb^{3+} ва Pr^{3+} ионларининг магнитооптикаси …….. 3

Малышева Мария Евгениевна
Магнитооптика некрамерсовских ионов Eu^{3+}, Tb^{3+} и Pr^{3+} в парамагнитных кристаллах ……..…….. 23

Malysheva Mariya Yevgeniyevna
Magnetooptics of the Non-Kramers ions Eu^{3+}, Tb^{3+} and Pr^{3+}in paramagnetic crystals ……. 43

Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ
List of published works ……..……..……..…….. 47

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

ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ

МАЛИШЕВА МАРИЯ ЕВГЕНИЕВНА

ПАРАМАГНИТ КРИСТАЛЛАРДА НОКРАМЕРС Eu^{3+}, Tb^{3+} ВА Pr^{3+} ИОНЛАРИНИНГ МАГНИТООПТИКАСИ

01.04.05–Оптика

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

Тошкент –2019

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида рақам билан B2017.2.PhD/FM68 рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Ўзбекистон Миллий Университетида бажарилган.

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

Илмий раҳбар:	**Валиев Уйгун Вахидович** физика-математика фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	**Нематов Шерзод Каландарович** физика-математика фанлари доктори
	Ахмеджанов Фархад Рашидович физика-математика фанлари доктори, доцент
Етакчи ташкилот:	**Самарканд Давлат Университети**

Диссертация ҳимояси Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ҳузуридаги DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил «___»_____ соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил:100125,Ташкент ш., Дўрмон йўли кўчаси, 33 ўй. Тел./факс: (+99871) 262-32-54, e-mail:info@iplt.uz, Ион – плазма ва лазер технологиялари институти мажлислар зали)

Диссертацияси билан Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган). Манзил:100125, Тошкент ш., Дўрмон йўли кўчаси, 33 ўй. Тел./факс: (+99871) 262-32-54.

Диссертация автореферати 2019 йил «___» _____ куни тарқатилди.

(2019 йил «____»_____даги __ рақамли реестр баённомаси).

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

Д.Т. Усманов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби ф.-м.ф.д., катта илмий ходим

Б.Е. Умирзаков
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Замонавий магнитооптика икки маълум илмий йўналишни – физикавий оптика ва магнит ҳодисалар физикасини ўз ичига олган физиканинг бўлимларидан биридир. У ўз ичига ташқи магнит майдонига жойлаштирилган материаллар оптик хусусиятларининг анизотропияси билан боғлиқ муаммоларни ўз ичига қамраб олади. 1960 ва 1970 йилларда бошланган магнитооптик тадқиқотлар жадал ривожланишининг дастлабки босқичларида асосий эътибор етарлича магнитооптик эффектлар, яқинва инфрақизил диапозонларда юқори шаффофлик билан характерланувчи янги магнит нодир-ер (НЕ) диэлектриклар яратиш йўналишларига қаратилди.

Ҳозирги кунда дастлабки олиб борилган тадқиқотлардан олинган ўта қизиқарли натижалар тез орада ҳозирги вақтда яхши маълум бўлган фотоника, оптоэлектроника ва микроэлектроника соҳаларида ҳамда магнитооптик эффектлардан техник иловалар яратишда кенг имкониятлар пайдо бўлишига олиб келди. Бундан ташқари, нодирер магнит диэлектрикларини фундаментал тадқиқ қилишга катта қизиқиш мавжуд бўлиб, у ҳам бўлса уларнинг қаттиқ жисмлардаги магнит ҳодисалар бўйича фундаментал муаммоларни ечиш имкониятларини беришидадир.

Сўнгги 10-15 йил ичида уч валентли нодир-ер ионлари Eu^{3+}, Tb^{3+} ва Pr^{3+} лар биланлегирланган парамагнит кристаллар гранатлари – $R_3Ga_5O_{12}$ (RGaG) даги галлатлар ва $R_3Al_5O_{12}$ (RAG) алюминатларнинг оптик, магнит ва магнитооптик характеристикаларини ўрганишга бағишланган етарлича катта миқдордаги илмий ишлар пайдо бўлди. Бу ионлар (масалан, Tb^{3+}) билан фаоллаштирилган гранатлар кристаллари магнитланиши аксарият ҳолларда уларнинг оптик характеристикаларидаги ўзгаришлар стандарт номагнит спектроскопик методлар ёрдамида олинган спектрлар билан солиштирилганда сезиларли даражада бўлади (одатда 50% дан 100% гача). Маълумки, НЕ–бирикмаларига ўхшаш бирикмаларнинг магнит хусусиятлари НЕ–ионларининг мультиплетлари пастки сатҳларининг тўлқин функциялари симметриялари ва кўринишлари орқали аниқланади. Айни вақтда, Фарадей эффекти (ФЭ), магнит циркуляция қутбланиш алюминесценцияси (МЦҚЛ), магнит доиравий дихроизми (МДД) каби магнитооптик фаоллик катталиклари муҳим даражада гранатлар кристалларидаги бу нокрамерс НЕ – ионларининг уйғотилган мультипетлари ҳиссаси билан аниқланади. Лекин ҳозирги вақтда қуйи симметрикликка эга D_2 симметрияли кристалл майдон томонидан таъсирга учрайдиган, галлат ва алюминат гранаталари таркибига киритилган нокрамерс НЕ – ионлари Eu^{3+}, Tb^{3+} ва Pr^{3+} энергетик спектрлари структураси бўйича экспериментал тадқиқотлар тўғрисида бирор–бир маълумот йўқ. Бундан ташқари, тадқиқ қилинаётган НЕ–ионлари асосий мультипетларининг «квазидуплет» деб аталувчи тузилишибилан боғлиқ магнитоопотик фаолликнинг пайдо бўлиши макроскопик механизмлари кам ўрганилган.

Ҳозирги кунда Ҳаракатлар стратегияси асосида Ўзбекистон Республикасининг келгусидаги ривожланишининг 2017–2021[1] йилларга мўлжалланган беш устувор йўналишлар бўйича илмий-тадқиқот ишларини амалга оширишнинг мақсадиҳамда вазифалари белгилаб олинди, уларни рағбатлантириш, илмий ва иновацион ютуқларни амалиётда қўллашнинг самарали механизмларини яратиш, олий таълим муассасалари ва илмий-тадқиқот институтлари қошида махсус илмий-экспериментал лабораториялар, юқори технологиялар марказлари ва технопаркларни ташкил қилиш чора-тадбирлари кўриб чиққан ҳолда амалга оширилмоқда. Шу муносабат билан таркибига НЕ-бирикмаларининг оптик ва магнитооптик усуллари киradиган тадқиқотнинг илмий-амалий методларига катта эътибор қаратилмоқда. Юқорида санаб ўтилган ушбу илмий тадқиқот методлари нафақат ўзбек тадқиқотчиларини, балки юқори технологиялар ривожланган дунё мамлакатлари илмий тадқиқотчиларини ҳам диққат марказидабўлиб келмоқда.

Ушбу тадқиқот натижалари Ўзбекистон Республикаси илмий тадқиқот фаолиятини янада юқори даражаларга чиқариш имконини беради. Ўзбекистон Республикаси Президентининг 7 февраль 2017 йил «Ўзбекистон Республикасининг келгуси ривожланишининг 2017-2021 йилларга мўлжалланган Ҳаракатлар стратегияси тўғрисидаги» №ПФ-4947 сонли, 27 апрель 2018 йил «Иновацион ғоя, технологиялар ва лойиҳаларни амалда қўллаш тизимини келгусида ривожлантириш чора тадбирлари тўғрисидаги» №ПҚ-3682 сонли, 7 май 2018 йил «Иқтисодий соҳа ва тармоқларда инновацияларни киритиш механизмларини янада такомиллаштириш борасида қўшимча чора-тадбирлар тўғрисидаги» №ПҚ-3698 сонли қарорлари ҳамда ушбу фаолият соҳасига тегишли бошқа ҳуқуқий-норматив ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация иши тадқиқотлари хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республиканинг фан ва технологиялари ривожлантиришининг устувор йўналишларига. Мазкур тадқиқот республикасида фан ва технологияларни ривожлантиришнинг II. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги»га мос равишда амалга оширилган.

Муаммонинг ўрганилган даражаси. Ҳозирги кунда нодир-ер магнит диэлектрикларини фундаментал тадқиқ қилишга катта қизиқиш мавжуд бўлиб, у ҳам бўлса уларнинг қаттиқ жисмлардаги магнит ҳодисалар бўйича фундаментал муаммоларни ечиш имкониятларини беришидадир.

Магнитооптик эффектларнинг (моҳияти бўйича дифференциал) ташқи физик таъсирларга ўта юқори сезгирлиги туфайли ушбу тадқиқотлар нодир-ер металлари бирикмаларининг энергетик спектрлари ва тўлқин функцияларини ўрганиш учун фойдаланиладиган анъанавий методлар ёрдамида олиб бўлмайдиган муҳим ва ноёб ахборотларни олиш имконини беради.

[1]Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил, 7 февралдаги № ПФ-4947 сонли Фармони «2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегияси».

Ушбу ёндошувнинг кўриниб турган афзалликлари бу моделлаштириш ва ҳисоблашларнинг нисбатан соддалиги бўлиб, улар галлатлар (RGaG) ҳамда алюминатлар (RAG) гранатлари таркибига киритилган Eu^{3+}, Tb^{3+} ва Pr^{3+} нинг магнитооптик спектрлари интерпретациясини амалга ошириш имконини беради. Сўнгги 10-15 йил ичида нодир-ер металлари бирикмаларининг магнитооптикаси ва оптикасига бағишланган етарлича катта миқдордаги илмий ишлар пайдо бўлди. Шунингдек, замонавий илмий адабиётларда бу бирикмаларнинг доиравий магнитооптик анизотропияси бўйича кристалл майдон ва (4f→4f) ички конфигурацион ҳамда (4f→5d) конфигурациялар электрон ўтишлар интенсивлиги назарияларида энг сўнгги ишланмалардан фойдаланган ҳолда олинган тажриба натижаларини ўз ичига олган ишлар сони етарлича. Бундан ташқари, XX асрнинг сўнгги йилларида турли мамлакатлар олимлари томонидан НЕ–бирикмаларида магнитооптик ҳодисаларни тушунтириш мақсадида микроскопик назария муваффоқиятли қўлланилди. Уларга магнитооптик фаоллик (ФЭ, ЛМДҚ, МДД) юзага келиши янги микроскопик механизмининг очилишини киритиш мумкин. Бу механизм гранат структурасидаги нокрамерс НЕ– ионларининг яқин ётган штарк синглетлари ҳолатларининг Н магнит майдони билан «қўшилиши» билан боғлиқ бўлиб, Tb^{3+} ва Pr^{3+} ионлар билан фаоллаштирилган қатор кристаллар гранатларида кузатиладиган магнитооптик эффектларнинг рекорд қийматларини тўғри талқин қилиш имконини беради. Лекин, рекорд магнитооптик эффектларнинг пайдо бўлиш табиатини батафсил қараб чиқиш нокрамерс НЕ– ионлари Eu^{3+}, Tb^{3+} ва Pr^{3+} ҳолатининг магнитооптик-фаол 4f → 4f ўтишлари комбинациялари ғалаёнлар назарияси (тўлкин функцияларини «қўшиш»ни ҳисобга олган ҳолда) ва танлаш қоидаси (симметрия бўйича)ни ўрнатиш бўйича бир қатор масалаларни ечишни талаб қилади.Бундан ташқари, қуйи симметрияга эга D_2 симметрияли кристалл майдонларда нокрамерс НЕ– ионлари Eu^{3+} , Tb^{3+} ва Pr^{3+} нинг асосий $4f^{(n)}$–конфигурацияси мультиплетлари энергетик спектрлари тўғрисидаги ахборотларнинг йўқлиги каби, тадқиқ қилинаётган НЕ– ионлари асосий мультиплетларининг «квазидуплет» структурасини ҳисобга олган ҳолда парамагнит кристаллардаги магнитооптик эффектларнинг пайдо бўлиши механизмларининг мавжуд эмаслиги мазкур тадқиқот мавзусини танлашга асосий сабаб бўлди. Шу сабабли, ушбу диссертация ишда $R_3Ga_5O_{12}$ ва $R_3Al_5O_{12}$ гранатлар структураларида қуйи симметрияга эга D_2 симметрияли кристалл майдонларда нокрамерс НЕ– ионлари энергетик спектрларининг штарк ажралишлар уларнинг оптик ва магнитооптик хусусиятларига таъсири экспериментал ҳамда назарий тадқиқ қилиш вазифаси қўйилди.

Диссертациямавзусининг диссертация бажарилган олий-таълим муассасаси илмий-тадқиқотишлари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти ЎМУ да давлат бюджети бўйича олиб борилаётган «Конденсирланган муҳитларнинг оптик тадқиқотлари» мавзусидаги фундаментал тадқиқотлар билан бевосита боғлиқ. Натижаларнинг бир қисми Ўзбекистон Миллий Университетида олиб борилган ва олиб борилаётган ОТ-

Ф2-064 «Магнитооптик оптик методлар ёрдамида нодир-ер металлари ва ўтиш металлари оксидларида ичкимарказий ўтишларни тадқиқ» (2007-2011) ва ОТ-Ф2-09 «Кўп компонентали оксидланган кристаллар спектрал характеристикаларига оптик ионизацион нурланишларва уларнинг таъсири механизмларининг физик асослари» (2017-2020) мавзуларидаги илмий лойиҳаларни бажариш мобайнида олинган.

Тадқиқотнинг мақсади таркибига Pr^{3+} иттрий-алюминий ва Eu^{3+} ҳамда Tb^{3+} нокрамерс ионлари киритилган гадолиний–галлий кристаллари гранатларининг магнитооптик, магнит ва оптик хусусиятларини экспериментал ва назарий тадқиқ қилиш ва парамагнит кристалларда магнитооптик эффектларнинг юзага келиш механизмларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

$Eu_3Ga_5O_{12}$(EuGG) парамагнит гранати монокристаллида Фарадей эффекти (ФЭ) дан Верде V гиромагнит доимийлик катталикларини назарий йўл билан ҳисоблаш ва уларнинг тажриба натижалари билан солиштириш;

ўлчанган магнит доиравий дихроизми (МДД) ва оптик ютилиш спектрларини солиштириш, шунингдек 90К ва 300К температураларда кўринадиган ва яқин ультрабинафша соҳаларда парамагнит гранат монокристалларида Eu^{3+}, Tb^{3+} ва Pr^{3+} нокрамерс ионлари магнит циркуляр қутбланиш люминесценцияси (МЦҚЛ) ва люменесценция спектрларини солиштириш;

$Eu_3Ga_5O_{12}$(EuGG) парамагнит гранати монокристалли магнит қабул қилувчанлиги катталигини назарий йўл билан ҳисоблаш ҳамда экспериментал тадқиқ қилиш;

ташқи H-магнит майдони таъсирида $^7F_1$ мультиплет ҳолатининг $^7F_0$ ҳолати билан «аралашиши»ни ҳисобга олган ҳолда $^7F_0 \rightarrow {}^5D_1$ ўтишнинг магнитодипол характерини назарий йўл ҳамда эксперимантал асослаш;

тажриба йўли билан оптик ўтишлар Жад параметрлари интенсивлигига ўхшаш, ичкиконфигурацион $4f \rightarrow 4f$ переходов $F_\lambda(\lambda = 2, 4, 6)$ ўтишларнинг магнитооптик-фаол интенсивликлари тўғрисида маълумотлар олиш мақсадида МДД моментлар методи асосида тартиблашмаган $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$: 5% Pr^{3+} парамагнит кристаллининг магнитооптик ютилиш спектрларини тадқиқ қилиш ва интерпретациялаш.

Тадқиқотнинг объекти $Eu^{3+}(4f^8)$, $Tb^{3+}(4f^8)$ ва $Pr^{3+}(4f^2)$ нокрамерс ионлари киритилган $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG), $Y_3Ga_5O_{12}$ (YGG), $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG), $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$парамагнит гранатлар монокристаллари, шунингдек $Eu_3Ga_5O_{12}$(EuGG) монокристалли ҳисобланади.

парамагнит кристалларда магнитооптик эффектлар юзага келишининг асосий механизмларини ўрнатиш, энергетик спектрларнинг янада аниқроқ структураларини аниқлаш ҳамда магнитооптик, оптик ва магнит тадқиқот натижаларидан фойдаланиш асосида парамагнит гранатлар монокристалларида Eu^{3+}, Tb^{3+}ва Pr^{3+} нокрамерс ионларининг $4f^{(n)}$-электрон конфигурацияли асосий

ҳолати уйғотилган мультипетларининг яқин жойлашган штарк сатҳчалари тўлқин функцияларининг симметрик идентификацияларини амалга ошириш.

Тадқиқотнинг усуллари. Ютилиш, флуоресценция, магнит доиравий дироизми (МДД), люминесценциянинг магнит циркуляр қубланиши (ЛМЦҚ) спектрларини магнит, спектрал-люминесцент ва магнитооптик тадқиқ қилиш усуллари; магнитланган намунадан чиқувчи ёруғлик оқимларининг модуляциялашган қутбланиш методи; оптик схемадан чиққан сигналларни қайд қилиш электрон схемасида фойдаланиладиган синхрон детектирлаш методи; эксперимантал ва бошқа ахборотларни қайта ишлашнинг математик ва ҳисоблаш усуллари.

Ишнинг илмий янгилиги:

илк бор тажриба йўли билан $Eu_3Ga_5O_{12}$ парамагнит гранат монокристаллида кузатиладиган ФЭда «гиромагнит» улуш ҳиссаси ва Верде «гиромагнит» доимийси қиймати олинган ва олинган қийматлар назарий ҳисоблашлар натижалари билан мос келиши кўрсатилган;

парамагнит нодир-ер бирикмаларининг оптик ва магнитооптик тадқиқотларида олинган катталикларнинг таҳлили шуни кўрсатдики, ютилиш полосаларида энергетик спектрларида «квазидублет» структурага эга Pr^{3+} ва Eu^{3+} нокрамерс ионларида «ман қилинган» 4f→4f утишлар натижасида магнитооптик эффектларнинг юзага келишида квантомеханик «аралаштириш» эффекти муҳим роль ўйнаши топилган;

илк бор D_2 симметрия кристалл майдонида Eu^{3+} ионнинг кристалл-майдон сатҳлари учун тўлқин функциялари тўпламидан фойдаланган ҳолда етарлича катта температура интервалида кубик $Eu_3Ga_5O_{12}$ монокристаллининг [111] ўқи бўйлаб моляр магнит сингдирувчанлиги $\chi_m(Eu^{3+})$ нинг температурага боғлиқлиги назарий йўл билан ҳисобланган ва бу натижалар тажриба натижалари билан тўла мос келиши аниқланган;

илк бор EuGG НЕ-гранатида $^7F_0 \rightarrow {}^5D_1$ ўтишнинг магнитодипол характери интерпретациялари гранат структурасидаги Eu^{3+}ионининг $^7F_0$ и $^7F_1$ мультиплетлари Штарк ҳолатлари аралашишини ҳисобга олишга асосланган, Т=90К ва Т=300К температуралардаги МДД тадқиқотлари натижалари билан тасдиқланиши аниқланган;

$Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$: 5% Pr^{3+} тартиблашмаган парамагнит бирикмалар магнитооптик спектрларини аниқлаш асосида магнитооптик-фаол 4f→4f ички конфигурацион ўтишлар интенсивлигининг Жад параметрлари нисбати аниқланган ва уларнинг магнитооптик фаоллиги назарий йўл билан топилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

спектрнинг кўринадиган ва УБ соҳаларида ишлайдиган дисплейлар, оптик изоляторлар, ёруғлик нурланиши модуляторлари каби турли магнитооптик қурилмаларни НЕ– гранатларининг оптик ва магнитооптик хусусиятлари асосида ўрганиш;

тадқиқ қилинган НЕ–бирикмалардан стандарт оптик дамлашдан фойдаланган ҳолда микротўлқинли диапазондаги квант кучайтиргичлари ва генераторларида фаол муҳит сифатида фойдаланиш;

НЕ–ионлари аралашмаси билан легирланган турли фосфорларда амалга оширилувчи «квант нарезкаси» деб аталувчи эффектда ғалаёнланишни узатишда қатнашувчиоптик марказлар сифатида фойдаланиш.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги олинган экспериментал натижаларнинг бошқа қайд қилиш методлари ёрдамида олинган натижалар билан солиштириш, шунингдек экспериментал натижаларни назарий ҳисоблашлар билан солиштириш имкониятининг мавжудлигидадир.

Магнитооптик тадқиқотлар ўтказишда спектрал боғланишларни қайд қилиш ва қайта ишлашнинг замонавий методларидан фойдаланган бошқа тадқиқотчилар томонидан олинган натижалар билан солиштириш ва ўтказилган параллел ўлчашлар натижалари билан асосланади.

Тадқиқот натижларнининг илмий ва амалий аҳамияти. Оптик ва магнитооптик тадқиқот натижаларини солиштириш, парамагнит кристалларда нокрамерс НЕ–ионларининг асосий ва уйғотилган ҳолатлари тўлқин функцияси симметрияси ҳақидаги ахборотларни олиш имкониятлари. Шунингдек НЕ–магнетикларнинг оптик ва магнитооптик хусусиятларини белгиловчи физик механизмларнинг фундаментал тасввурларини амалий қўллаш ва ривожлантириш нуқтаи назаридан етарлича долзарб бўлган ҳамда НЕ–магнетикларнинг оптик ва магнитооптик хусусиятларини аниқлаб берувчи гранатлар монокристалларида (галлатлар ва алюминатлар) Eu^{3+}, Tb^{3+} ва Pr^{3+} ионларнинг магнитооптик фаоллиги асосий механизмларини микроскопик даражада ифодалаш.

Тадқиқот натижаларининг амалиётда қўлланилиши қуйидагилар орқали аниқланади: магнитооптика соҳасида олиб борилган чуқурлаштирилган фундаментал тадқиқотлар жуда муҳим, чунки ҳозирги вақтда аксарият оптик ва аралаш техник иловаларда фойдаланиш учун магнитооптик қурилмалар кундан-кун кўплаб ишлаб чиқарилмоқда.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Таркибига НЕ–ионлари Eu^{3+}, Tb^{3+} ва Pr^{3+} киритилган гранатлар (галлатлар и алюминатлар) монокристалларининг магнитооптик хусусиятларини аниқлаш асосида:

гадолиний – галлийли гранатлари структурасидаги Tb^{3+} ионлари магнитооптикаси ҳамда магнитоптик эффектларни кузатиш хусусиятлари ва кристалларда модуляцияланган қутбланиш усулидан фойдаланган ҳолда кристалларда магнитооптик эффектларни ўлчаш бўйича олинган натижалар: «Технодизайн-консалтинг» компаниясида магнитооптик материаллар, хусусан турли кристалл матрицаларда Tb^{3+} ионлари магнитооптикасига тегишли бўлган материалларни ишлаб чиқаришда фойдаланилган (Россия Федерацияси «Техно-дизайн консалтинг» компаниясининг 2019 йил 15 майдаги 10/04-19-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш таркибига Eu^{3+}, Tb^{3+}, ионлари киритилиб ўстирилган иттрий-алюминийли гранатлар

кристалларининг магнитооптик фаоллигини сезиларли даражада ошириш имконини берган;

европий-галлийли гранатларидаги ички конфигурацион ўтишлардаги ютилиш спектрлари хусусиятлари бўйича олинган натижалар хорижий журналларда (Journal of Rare Earths,Vol 30, №10, 2012, IF:2,524; Journal of Rare Earths,Vol 30, №12, 2015, IF:2,524; Journal of Applied Physics,114,163521, 2013; IF:1,82; Journal of Luminescence, 2015, IF:1,40; Coordination Chemistry Reviews, 295, 2015, IF:4,87) кристалл структураларда НЕ-ионлари энергетик сатҳлари тўлқин функцияларини ҳисоблаш ва энергетик спектрларини интерпретация қилиш учун фойдаланилган. Илмий натижаларнинг қўлланиши Eu^{3+} иони $4f^6$-конфигурациясининг энергетик структурасини аниқлаш, ички конфигурацион ўтишлар интенсивлигини ҳисоблаш имконини берган ва босим ўзгаргандаги европий-галлийли гранатлар кристалл структурасидаги ўзгаришларни кўриш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 6та халқаро ва республика миқёсидаги илмий конференцияларда муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича 16 та илмий иш чоп қилинган, шулардан 9 таси Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий нашрларда илмий мақола, жумладан 3 таси хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва хажми. Диссертация кириш, олти боб, хулоса ва адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертация ҳажми 130 бетни ташкил қилади.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 6та халқаро ва республика миқёсидаги илмий конференцияларда муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича 16 та илмий иш чоп қилинган, шулардан 9 таси Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий нашрларда илмий мақола, жумладан 3 таси хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва хажми. Диссертация кириш, олтита боб, хулоса ва адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 129 бетни ташкил қилади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида мавзунинг долзарблиги асослаб берилган, тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари шакллантирилган, мавзунинг объекти ва предмети тавсифланган, тадқиқотнинг республика фан ва технологиялар ривожланишининг устувор йўналишларига мос келиши кўрсатиб берилган, тадқиқот нтижаларининг амалий аҳамияти ва илмий янгилиги баён қилинган,

олинган натижаларнинг амалда қўлланилишининг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган. Диссертация структураси ва диссертацион мавзу бўйича чоп этилган ишлар ҳақида маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «Нодир-ер парамагнит гаранатларининг кристаллографик структураси ва магнитооптик хусусиятлари» мавзусидаги биринчи бобида магнит, оптик ҳамда магнитооптик хусусиятлар, галлатлар ва алюминатларнинг нодир-ер гранатлари кристаллографик структураси қараб чиқилади. Қуйи симметрияли кристалл майдонда мавжуд НЕ–ионлари энергетик спектрларидаги ман қилинган конфигурациялар ичидаги ўтишлар учун Жад-Офельт назариясининг асосий ҳолатлари қараб чиқилган. НЕ–бирикмалари магнитооптикаси бўйича адабиётлар таҳлили асосида қаралаётган объектларда магнитооптик фаолликнинг юзага келиши маълум бўлган барча механизмлари батафсил баён қилинган. Диссертациянинг тадқиқотлар мавзусига оид экспериментал ва назарий ишларининг қисқача таҳлили берилган.

«Ўлчаш методикаси ва экспериментал қурилма» мавзуидаги иккинчи бобда оптик, магнит ва магнитооптик тадқиқотлар ўтказишда фойдаланилган экспериментал қурилма ва ўлчаш методикалари баён қилинган. Тадқиқ қилинган намуналар характеристикалари келтирилган ҳамда ўлчаш хатоликлари таҳлил қилинган.

Таркибига $Eu^{3+}(4f^8)$, $Tb^{3+}(4f^8)$ ва $Pr^{3+}(4f^2)$ нокрамерс ионлари киритилган $Gd_3Ga_5O_{12}$(GGG), $Y_3Ga_5O_{12}$ (YGG), $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG), $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$ парамагнит гранатлари монокристаллари, шунингдек $Eu_3Ga_5O_{12}$(EuGG) монокристалли МДУнинг магнетизм муаммолар лабораториясида Б.В.Милл томонидан ўстирилган. «эриётгандаги эритма» дан ўз-ўзидан кристалланиш методи ёрдамида олинди (юқори температурали Чохральский методи). Намуналар рентгенографик метод орқали (111) ва (110) кристаллографик текисликларда йўналтирилган.

Оптик, магнит ва магнитооптик тадқиқотларни амалга оширишда қуйидаги экспериментал қурилмалардан фойдаланилди:

1) МДД ва ЛМЦҚ спектрларини ўлчаш қурилмаси.

2) Люминесценция спектрларини ўлчаш қурилмаси.

3) НЕ-бирикмалари магнит хусусиятларини ўлчаш қурилмаси: тебранувчи намунали тебраниш магнетометри.

4) Оптик ютилиш спектрларини ўлчаш қурилмаси:оптик зичлиги *D* бўлган узлуксиз сигналларни қайд қилиш имкони мавжуд МДР-23 монохроматор асосида амлга оширилган бир нурли дифракцион спектрофотометр.

5)Фарадей эффектини ўлчаш қурилмаси.

«Нодир-ер парамагнит кристалларда магнит-дипол ўтишлар магнитооптикаси « номли учинчи бобда $Eu_3Ga_5O_{12}$(EuGG) парамагнит гранат монокристалли магнитооптикасида (ФЭ ва МДД) магнитодипол ўтишларнинг ҳиссаси бўйича тадқиқот, ва шунинг деккаралаётган кристаллнинг спектрларни оптик ютиши спектрларини қайд қилиш натижалари келтирилган. 1-расмда

$Eu_3Ga_5O_{12}$(EuGG) парамагнит гранат монокристаллида кузатилган Фарадей эффектининг [111] кристалл йўналишида H=9,0 кЭ доимий магнит майдонида 500 ÷ 800 нм тўлқин узунлигида (шунингдек, 632.8 нм ва 1150 нм лазер тўлқин узунликларида) 300K температурада ўлчанган спектрал боғланиши келтирилган. Ўтказилган тадқиқот натижаларига кўра, (Eu^{3+}) европий уч валентли нодир-ер (НЕ) иони учун V Верде доимийси рухсат этилган 4f→5d ўтишлар резонанс частоталаридан узоқроқдаги ёруғлик частоталари диапазонида спектрал боғланиши қуйидагича ифодаланиши мумкин:

$$V(Eu^{3+}) = \frac{K}{\lambda^2 - \lambda_0^2} + V_{gm}^{(m)} \qquad (1)$$

бу ерда биринчи ҳад EuGG даги магнито-фаол электродипол (ЭД) ўтишлардаги фарадей айланишларининг ҳиссасини ифодалайди, λ_0 = 250 нм–гранат структурасидаги Eu^{3+} ионларда содир бўладиган рухсат этилган ЭД ўтишларнинг «эффектив» деб аталувчи тўлқин узунлиги, яъни «гиромагнит» ФЭ. $V_{gm}^{(m)}$ иккинчи ҳад магнитооптик-фаол магнитодипол (МД) ўтишлар фарадей айланишларида λ тўлқин узунлигига боғлиқ бўлмаган ҳиссани ифодалайди. (1) ифодага кўра ФЭ даги $V_{gm}^{(m)}$«гиромагнит» катталик ҳиссаси V~1/(λ^2-λ_0^2) чизиқли боғланишнинг ордината ўқига экстраполяциясидан аниқланади (1-расмга қаранг). Бу йўл билан тажрибада топилган Верде «гиромагнит» доимийси катталигининг қиймати T=300 K температурада $V_{gm}^{(m)}$=+(0.0038 ± 0.0005) мин/см*Э ни ташкил қилди.

ФЭ нинг спектрал боғланишини тадқиқ қилишдан ташқари, биз Фарадей «гиромагнит» эффектини ифодаловчи муносабатни назарий ҳисоблаш амалга оширилди. Натижада $Eu_3Ga_5O_{12}$(EuGG) парамагнит гранати монокристаллида Фарадей магнитодипол эффекти учун умумий ифода $\omega^2 >> \omega_{a,b}^2$ соҳада (тушаётган электромагнит тўлқин частотаси ω МД ўтишлари резонанс частоталари ω_{ab}дан етарлича катта) T≠0 бўлмаганда қуйидаги кўринишда ёзилиши мумкин: гранат кристаллида Eu^{3+} ионларининг натижавий қабул қилувчанлиги одатда χ_1, χ_2 ва $\Delta\chi_{VV}^{(0)}$ ларнинг аддитив йиғиндиси кўринишида тасвирланади:

$$\alpha_F^{(m)}(Eu^{3+}) = \frac{2\pi\bar{n}}{c}\left(\frac{g_1 e}{mc}\right)\cdot[\chi - \frac{1}{2}(\chi_1 + \chi_2)]H = \frac{2\pi\bar{n}}{c}\left(\frac{g_1 e}{mc}\right)\cdot\chi'' H \qquad (2)$$

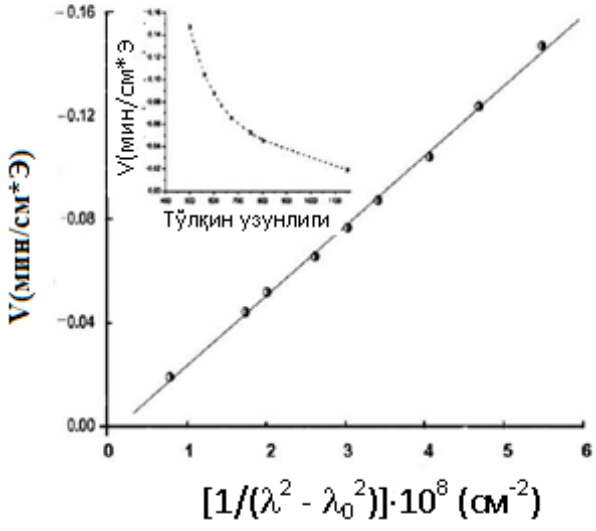
Гранат кристаллида Eu^{3+} ионларининг натижавий қабул қилувчанлиги одатда χ_1, χ_2 ва $\Delta\chi_{VV}^{(0)}$ ларнинг аддитив йиғиндиси кўринишида тасвирланади:

$$\chi = (\Delta\chi^{(0)}{}_{VV} + \chi_1 + \chi_2) \qquad (3)$$

χ_1 и χ_2 Eu^{3+} ионлари J_1 = 1 ва J_2 = 2 мультиплетларнинг зееман сатҳ остиларининг термик жойлашиши билан характерланувчи хусусий(парциал) магнит қабулқилувчанлиги; $\Delta\chi^{(0)}{}_{VV}$ – $^7F_0$ и $^7F_1$ мультиплетлари тўлқин функцияларининг ташқи майдонда «аралашиши» га боғлиқ бўлган қабул

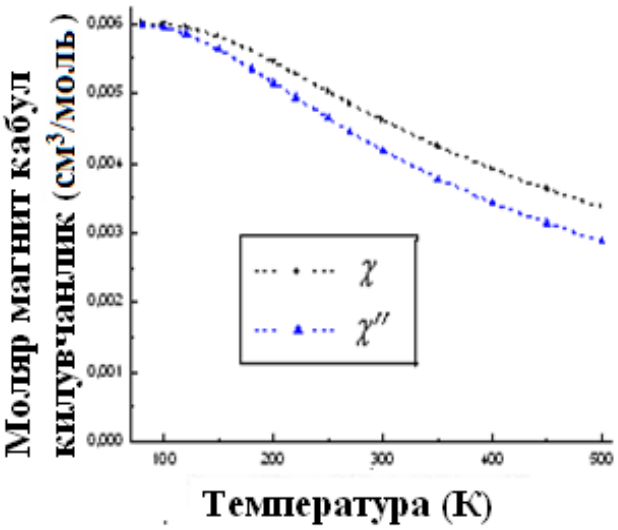
қилувчанликка Ван-Флек ҳиссаси; $g_1=g_2=1,5$ – $J_1 = 1$ и $J_2 = 2$ Ланде омиллари (факторлари); $\Delta_1 \approx 350$ cm^{-1}; $\Delta_2 \approx 10^3 cm^{-1}$. Шундай қилиб, Eu^{3+} ионлари билан легирланган парамагнит бирикмаларда частотага боғлиқ бўлмаган $V_{gm}^{(m)}$ Верде «гиромагнит» доимийси Eu^{3+}ионлари магнит қабул қилувчанлиги χ(T) нинг худди шунга ўхшаш боғланишлари орқали аниқланмайди, айниқса χ(T) ва χ′′(T) ларнинг (3) ва (2) ифодалар ёрдамида ҳисобланган ва 2-расмда келтирилган температуравий боғланишларини график таққослашдан кўриниб турган 100К температурадан юқори температураларда. $V_{gm}^{(m)}$ Верде «гиромагнит» доимийсининг (4) формула бўйича назарий ҳисоблашларда олинган қиймати $V_{gm}^{(m)}$=+0.0041 мин/см*Э ни ташкил қилди ва бу катталик тажрибада олинган катталикларга мос келади.

3-расмда T=85К температура ва H=6.2кЭ майдонда $^7F_0 \rightarrow {}^5D_1$ ютилиш полосасида ёзиб олинган ютилиш (пунктир чизиқ) ва МДД (яхлит чизиқ) спектрлари келтирилган. Олинган спектрал боғланишларни таҳлил қилишдан келиб чиқадики, EuGG монокристалли МДД сида Ван-Флекнинг «аралаштириши» (B ҳисса) H майдон билан «аралаштирилган» $\Gamma_1(^7F_0)$, $\Gamma_2(^7F_1)$ ва $\Gamma_1(^7F_0)$, $\Gamma_3(^7F_1)$ ҳолатлардан $^5D_1$ мультиплетнинг яккаланган Γ_4 синглет ҳолатига ўтишлар билан аниқланади (3-расм). Айни вақтда 3-расмда 527.2 нм тўлқин узунлигида яққол кузатилаётган МДД чўққиси ютилиш чизиғидан биринчи тартибли ҳосила каби, характерли S-симон кўринишга эга бўлади, ва $\Gamma_1(^7F_0)$ асосий ҳолатидан $^5D_1$ мультиплетнинг Γ_2, Γ_3 «квазидублет»ларига

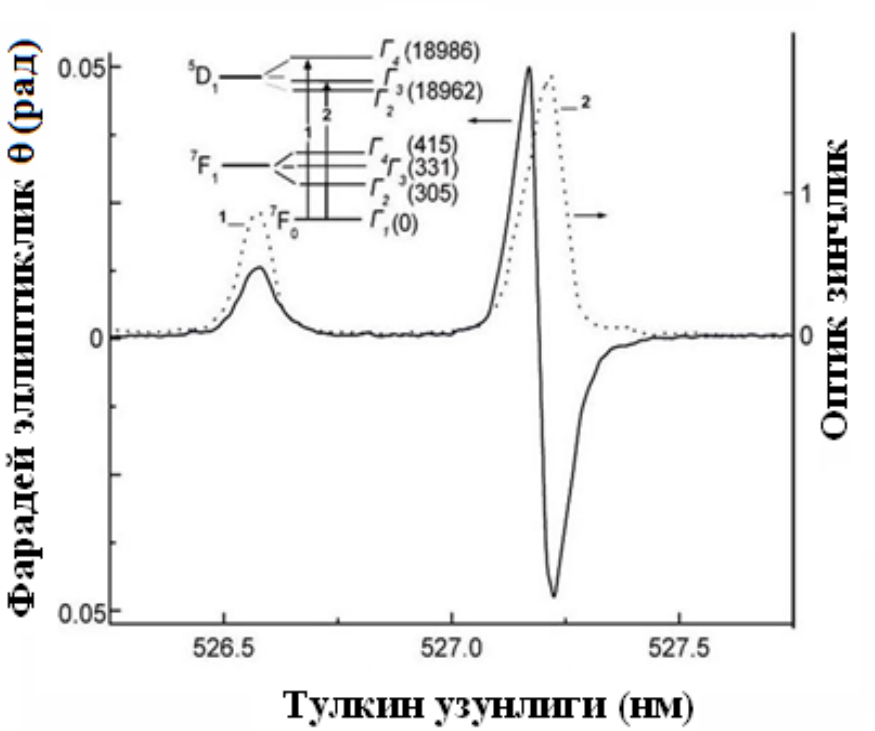


1-расм. $V(Eu^{3+}) = \dfrac{K}{\lambda^2 - \lambda_0^2} + V_{gm}^{(m)}$

функционал боғланиш. Қўшимчада: T=300К температурада ўлчанган *V* Верде (Eu^{3+}) доимийси спектрал боғланиши.



2-расм. 85÷500К температура интервалида $\chi(T)$ и $\chi''(T)$ ларнинг ҳисобланган қийматларини солиштириш.



3-расм.Eu^{3+}: GGG да $^7F_0 \rightarrow {}^5D_1$ ютилиш полосасида H = 6.2 кЭ ташқи магнит майдонда (туташ чизиқ) T = 85 К температурада МДД да ёзилган ютилиш спектрлари (пунктир чизиқ).

«синглет→квазидублет» ўтишини ифодалайди. МДД спектрида 526.6 нм ютилиш чизиғида B – ҳаднинг пайдо бўлиши H ташқи магнит майдони орқали электрон ҳолатларнинг «аралашиши» билан юзага келган нодир-ер (НЕ) иони магнитооптик фаоллигини (МОФ) бир қийматли характерловчи МДД моментлар методи ёрдамида B/D муносабатни ҳисблаш орқали тасдиқланади (исботланади).

$$\frac{B}{D}=\frac{2S_m^2}{6{,}25\Delta_1}\cdot 2g_1=\frac{1.28}{\Delta_1}\cdot 2g_1 \qquad (4)$$

бу ерда $S_m=-2\sqrt{1-m^2}=-2$ Eu^{3+} иони учун. МДД методидан фойдаланганда, бу нисбат катталиги қуйидагича тасвирланади:

$$\frac{B}{D}=2.14\frac{<\Delta A/H>_0}{<A>_0}\ (5),<A>_0=<A>_0^{(1)}\rho_0(300)+<A>_0^{(3)}+<A>_0^{(4)} \qquad (5)$$

бу ерда $<A>_0^{(1)}$ - T=85K да ўлчанган 526.6 нм тўлқин узунлигидаги ютилиш чизиғининг оптик ютилиш қобилияти нолинчи моменти (3-расм); $\rho_0(300)$ - T=300K температурада Γ_1 ($^7F_0$) штарк системаостининг больцман тўлдирилиши (зичлиги); $<A>_0^{(3)}$ ва $<A>_0^{(4)}$ лар эса 4-расмдаги 3 ва 4 ютилиш чизиқларининг нолинчи моментлари

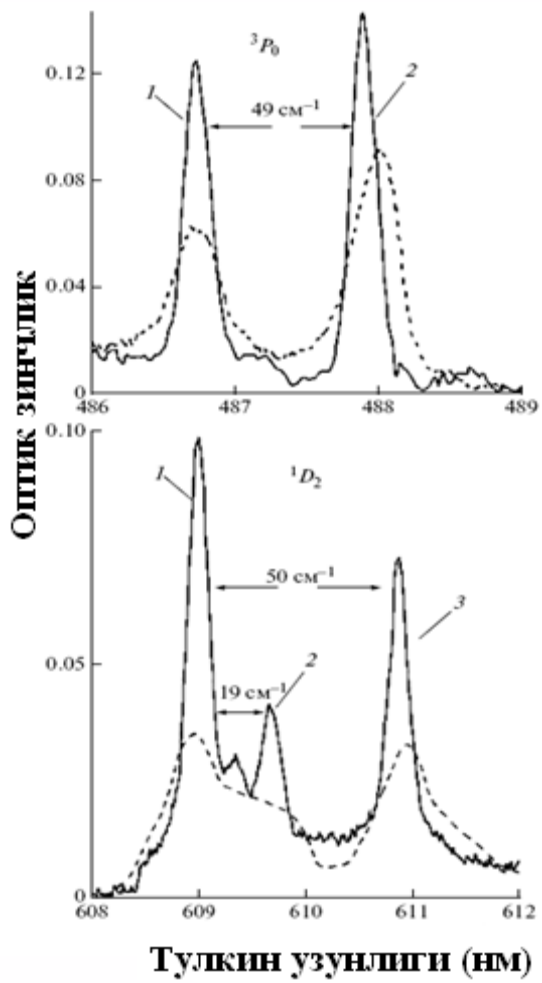
$$<\Delta A/H>_0=<\Delta A/H>_0^{(1)}\left[\rho_0(300)-\rho_1(300)\right] \qquad (6)$$

бу ерда $<\Delta A/H>_0^{(1)}$ - T=85K да ўлчанган 526.6 нм тўлқин узунлигидаги ютилиш

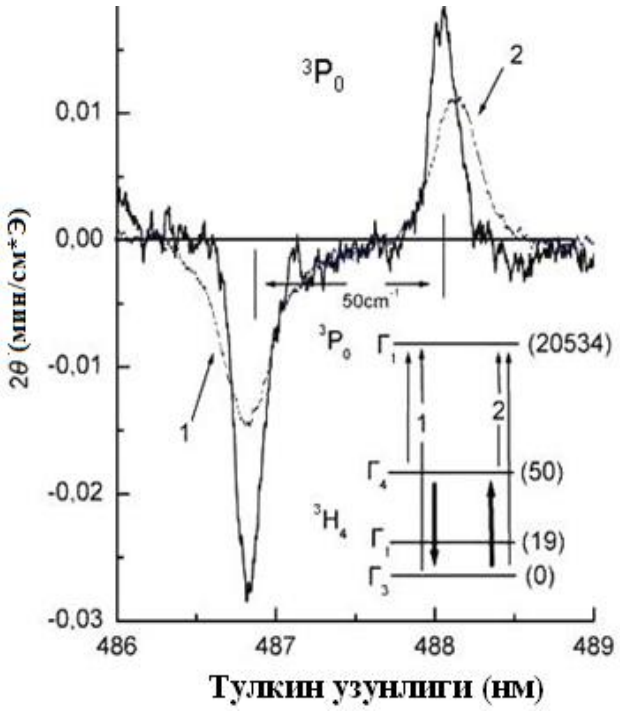
чизиғининг магнитооптик ютилиш қобилияти (МДД) нолинчи моменти (3-расм), ва $\rho_1(300)$ - T=300 K температурада $\Gamma_2(^7F_1)$ штарк системаостининг больцман тўлдирилиши (зичлиги). У ҳолда (5) ифодада $2g_1$ параметр учун тажрибада аниқланган қиймат 3.42 га тенг бўлади. Бу қиймат Eu^{3+} ионларидаги Фарадей «гиромагнит» эффекти ифодасидаги $2g_1$=3.0 назарий ҳисоблашларда олинган қийматга мос келади ва EuGG НЕ-гранатида $^7F_0 \rightarrow {}^5D_1$ магнитодипол характерини тасдиқлайди.

«Иттрий-алюминий гранатида Pr^{3+} ионларида магнит доиравий дихроизми» номли тўртинчи бобда ютилиш спектрлари ва Pr^{3+}:YAG парамагнит кристалли МДД си келтирилган.

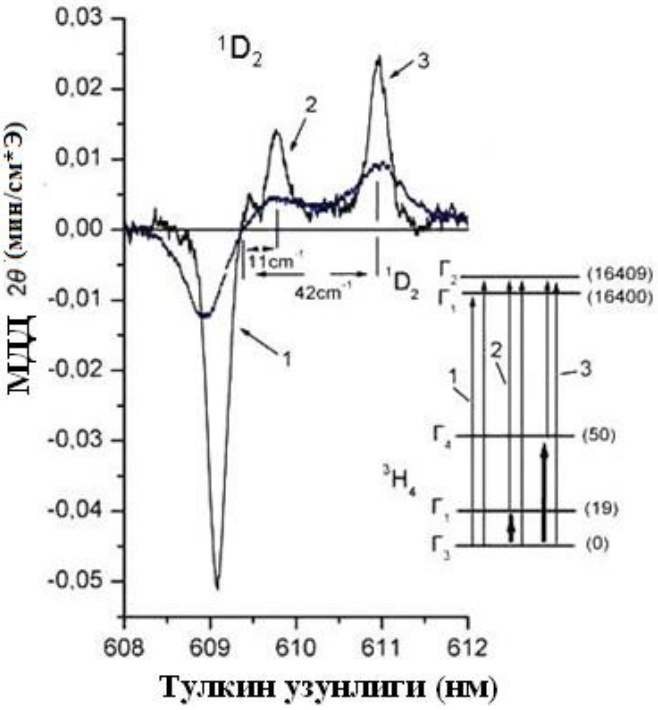
Pr^{3+}:YAG нинг магнитооптик ютилиш спектрлари Т = 90К и 300К температураларда спектрнинг УБ соҳасидаги 220 ÷ 320 нм (570 ч 31250cm^{-1}) ва кўринадиган соҳа спектрларидаги 486 ÷ 489 нм (20450 ч 20580cm^{-1}) ва 608 ÷ 612 нм (16340 ч 16450 cm^{-1}) (4-расм) тўлқин узунликларида ўлчанди. $^3H_4 \rightarrow {}^3P_0$ (1 ва 2 чизиқлар) (5-расм) ўтишлардаги МДД спектрал боғланишлари мос



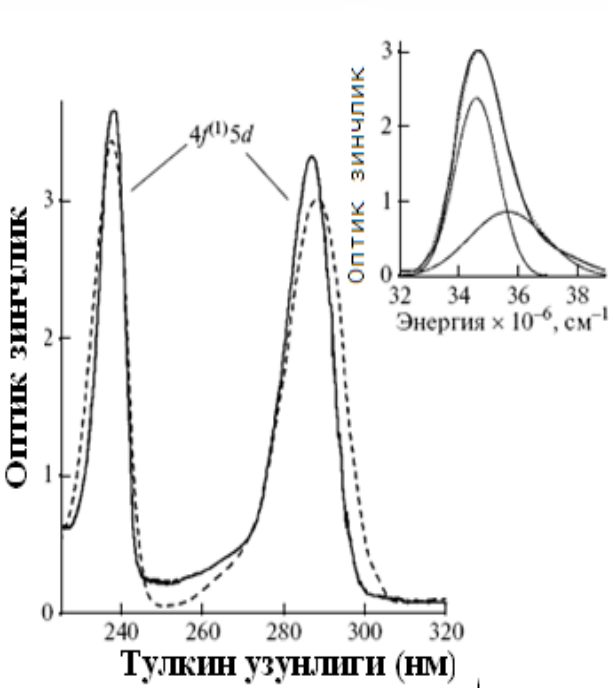
4-расм. Расмнинг юқори ва қуйи қисмларида Т = 90К (туташ чизиқ) ва 293К (пунктир чизиқ) температураларда $^3H_4 \rightarrow {}^3P_0$ ва $^3H_4 \rightarrow {}^1D_2$ ютилиш полосаларида ёзилган Pr^{3+}:YAG нинг ютилиш спектри келтирилган.



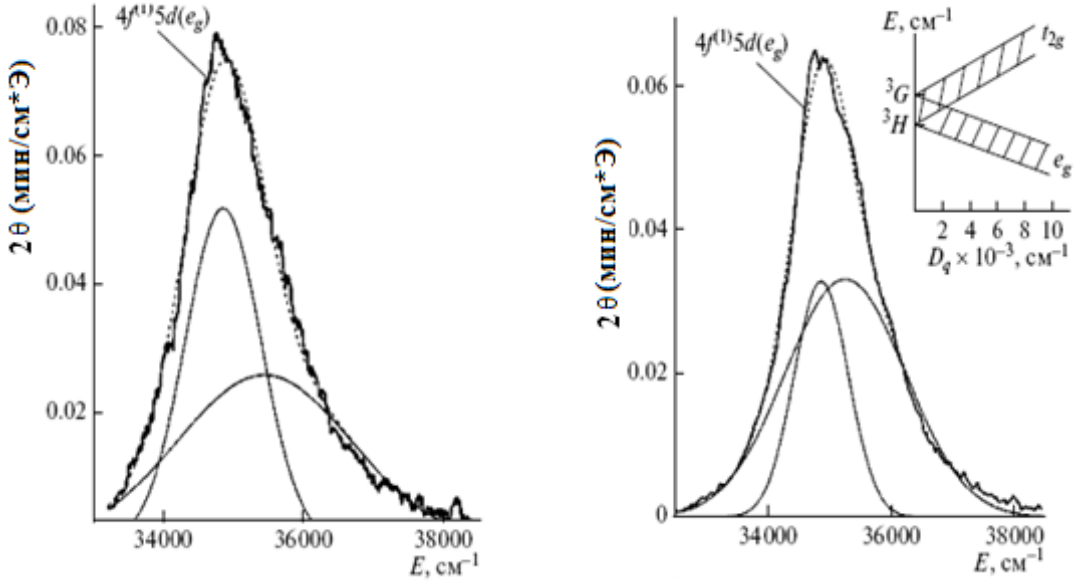
5-расм. [110] кристаллографик йуналиш бўйлаб Н = 10кЭ ташқи магнит майдонда ориентацияси жараёнида Т = 90К (туташ чизиқ) ва 293К (пунктир чизиқ) Pr^{3+}:YAG да $^3H_4 \rightarrow {}^3P_0$ ютилиш полосасида ёзилган МДД даги ютилиш спектри.



6-расм. [110] кристаллографик йуналиш бўйлаб H = 10кЭ ташқи магнит майдонда ориентацияси жараёнида T = 90К (туташ чизиқ) ва 293К (пунктир чизиқ) Pr^{3+}:YAG да $^3H_4 \rightarrow {}^1D_2$ ютилиш полосасида ёзилган МДД даги ютилиш спектри.



7-расм. T = 90К (туташчизиқ) ва 293К (пунктир чизиқ) температураларда ёзилган Pr^{3+}:YAG нинг УБ ютилиш спектри интенсивлиги.



8-расм. [110] кристаллографик йуналиш бўйлаб H = 10кЭ ташқи магнит майдонда ориентацияси жараёнида 288 нм ютилиш полосаси атрофида *T* = 90 (чапдаги расм) ва 300 К (ўнгдаги расм) температураларда Pr^{3+}:YAG да ёзилган МДД ютилиш спектрлари.

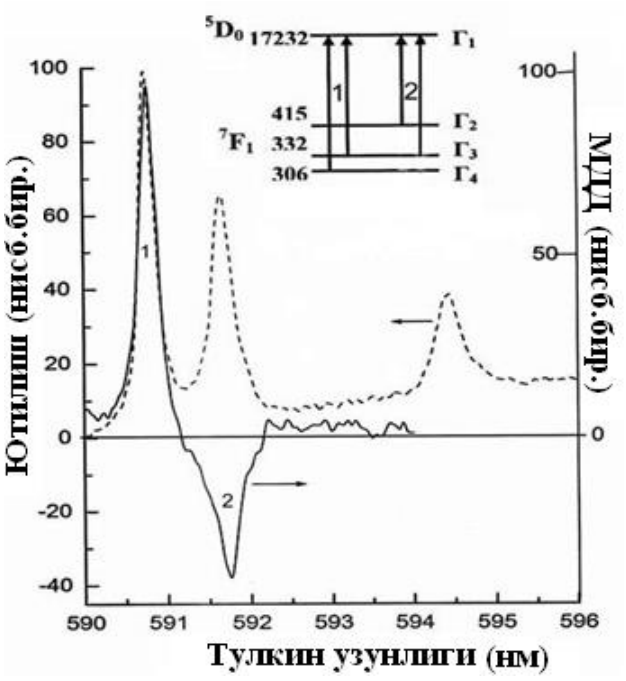
ютилиш чизиқлари билан устма-уст тушади (4-расм). Температура 90К гача туширилганда МДД чизиқлари тораяди ва амплитуда бўйича ортади, бунда

уларнинг юзалари ўзгармас сақланади (5-расм). Т = 90К и 300К температураларда $^3H_4 \rightarrow {}^3P_0$ нинг ўлчанган ютилиш полосасидаги 1-ва 2-чизиқларда МДД спектрларининг температуравий табиатини таҳлил қилиш шуни кўрсатдики, бу хусусиятлар Pr^{3+} ионининг Н ташқи магнит майдони билан асосий $^3H_4$ мультиплетининг энг қуйи штарк синглетларининг «аралашиши», яъни МДД нинг В-ҳади деб аталувчи механизмининг ҳиссаси билан асосланади. МДД нинг 1 ва 2 полосаларининг В-ҳадлари (ишора бўйича қарама-қарши) фақатгина мос равишда 0,0 $см^{-1}$ ва 50 $см^{-1}$ энергияларда ётувчи $^3H_4$, асосий мультиплетнинг $Г_3$ ва $Г_4$ штарк синглетларининг больцман тўлдирилиши (қаралаётган температурада) га боғлиқлиги сабабли, Т = 90К ва 293К температураларда қаралаётган системаостиларида тўлдирилишлар нисбати мос равишда $\rho_{Ã_3}(300K):\rho_{Ã_4}(300K)=1{,}27$, ва $\rho_{Ã_3}(90K):\rho_{Ã_4}(90K)=2{,}04$ га тенг бўлади. В-ҳаднинг абсолют қиймати МДД полоса юзаси билан аниқланишини ҳисобга олган ҳолда, тажрибада олинган катталиклардан (5-расмнинг юқори қисмига қаранг) Т = 90К ва 300К температураларда $^3H_4 \rightarrow {}^3P_0$ нинг ютилиш полосаларидаги 1-ва 2-чизиқларда МДД спектрлари хусусиятларининг нолинчи моментлари мос равишда $<\theta_0^{(1)}(300K)>:<\theta_0^{(2)}(300K)>=1{,}25$ ва $<\theta_0^{(1)}(90K)>:<\theta_0^{(2)}(90K)>=2{,}0$ га тенг бўлиб назарий ҳисоблашларга тўла мос келади. $^3H_4 \rightarrow {}^1D_2$ ютилиш полосасида МДД нинг мураккаб структураси Pr^{3+} нокрамерс НЕ-ионининг МДД А – ҳади деб аталувчи МДД нинг («диамагнит» ҳади) МДД да қаралаётган спектр соҳасида устунлик вилувчи ҳиссаси билан тушунтириш мумкин (6-расм).

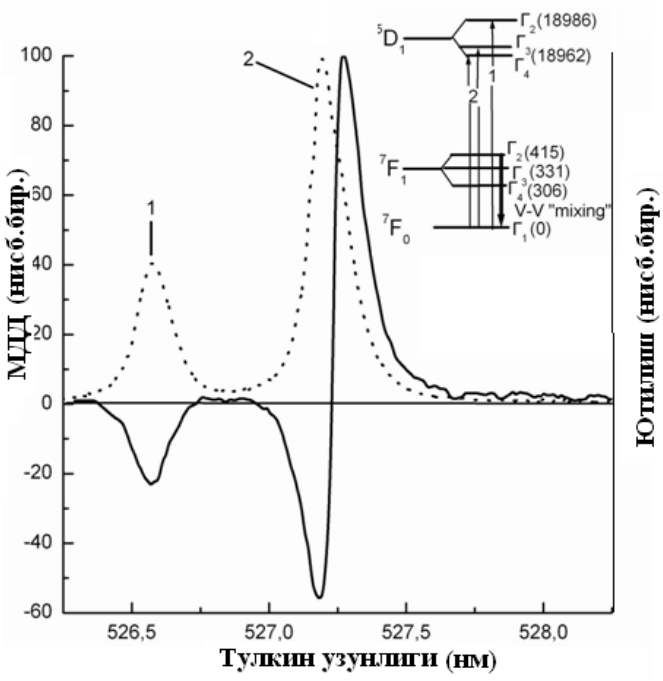
УБ спектрнинг 260-310 нм (7-ва 8-расмларга қаранг) тўлқин узунликлари интервалида празеодим-иттрийли граната-алюминатнинг оптик ва магнитооптик тадқиқотларида олинган катталикларнинг таҳлили натижасида шуни таъкидлаш мумкинки, кичик *T* температураларда МДД да тўлқин функциялари *H* ташқи майдон билан эффектив «қўшиладиган» Pr^{3+} ионининг асосий $^3H_4$ мултиплети асосий «квазитриплети» нинг $Г_3$ (0.0 $см^{-1}$) ва $Г_1$ (19 $см^1$) системаостиларининг термик тўлдирилиши асосий ҳиссани қўшар экан. МДД да $Г_3$ асосий сингет ҳолатининг $Г_4$ (50 $см^{-1}$) синглет ҳолатига Ван-Флек «аралашиши» билан қўшиладиган ҳисса катталиги эса тажриба натижаларига кўра темпертура пасайиши билан камаяр экан.

Шундай қилиб, биз иттрий-алюминийли гранат структурасидаги Pr^{3+} ионларда 4f→4f ман қилинган ўтишлар билан асосланган УБ-спектр соҳасида ва кўринадиган ютилиш полосаларида МДД нинг юзага келиш механизмларида асосий $^3H_4$ мультиплет ионининг учта қуйи штарк синглети ҳолатининг квантомеханик «қўшилиши» эффекти асосий роль ўйнайди деб хулоса қилишимиз мумкин, бу эса ўз навбатида таркибида уларни празеодим бўлган гранатларнинг магнит хусусиятларида устувор ҳисса қўшадиган нокрамерс НЕ-иониасосий «квазитриплети» контекстида талқин қилиш имконини беради.

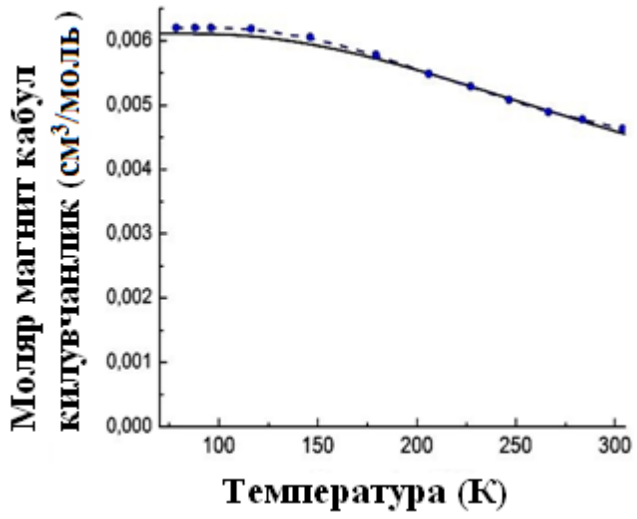
«Гадолиний галлийли ($Gd_3Ga_5O_{12}$) гранатда Eu^{3+} ва Tb^{3+} ионлари магнитооптик спектр хусусиятлари» номли бешинчи бобда оптик ва магнитооптик спектрларни солиштириш орқали гадолиний-галлийли (GGG) ва европий-галлийли гранатлари структурасида тадқиқ қилинаётган ионларнинг



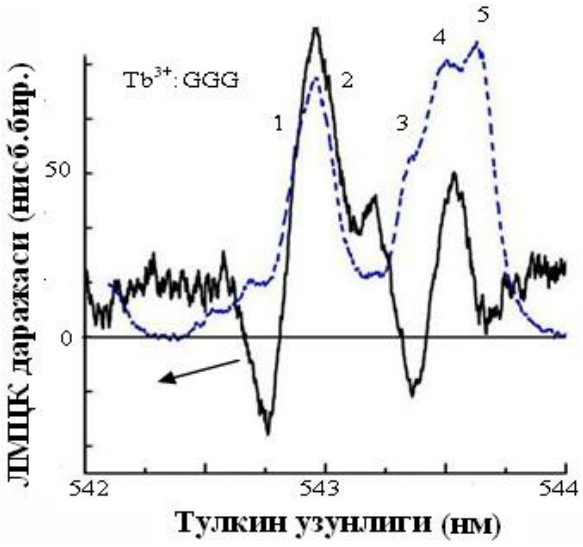
9-расм. Eu^{3+}: GGGда $^7F_1 \rightarrow {}^5D_0$ ютилиш полосасида H = 5кЭ ташқи магнит майдонда (туташ чизиқ) T = 300К температурада силлиқлаштирилмасдан ёзилган ютилиш спектрлари (пунктир чизиқ).



10-расм. Eu^{3+}: GGG да $^7F_0 \rightarrow {}^5D_1$ ютилиш полосасида H = 5кЭ ташқи магнит майдонда (туташ чизиқ) T = 300 К температурада силлиқлаштирилмасдан МДД да ёзилган ютилиш спектрлари (пунктир чизиқ).



11-расм. EuGaG кубик кристаллнинг [111] ўқи бўйлаб χ моляр магнит қабул қилувчанлигининг температурага боғлиқлиги: пунктир чизиқ ўлчанган катталиклар, туташ чизиқ эса ҳисоблаш натижаларига мос келади.



12-расм. H = 6,0 кЭ ташқи майдонда T = 85K температурада $^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ Tb^{3+}: GGG да ва Tb^{3+}:YGG да флуоресценция полосасида силлиқлаштирилмасдан ёзилган люминесценция (пунктир чизиқ) ва ЛМЦҚ (туташ чизиқ) спектрлари.

уйғотилган мультиплетларининг яқин жойлашган штарк системаостилари тўлқин функцияларини симметрик идентификация қилиш амалга оширилди.

9- ва 10- расмларда $Eu_3Ga_5O_{12}$ (EuGG) монокристалл учун 526 дан 596 нмгача бўлган спектрал ораликда ёзиб олинган ютилиш ва МДД спектрлари келтирилган. Ютилиш спектрида 16818, 16897 ва 16924 $см^{-1}$ (9-расм) энергияларда $^7F_1 \rightarrow {}^5D_0$ ютилиш полосалари учун учта чизиқ топилди. МДД спектрларининг таҳлили шуни кўрсатдики, Eu^{3+} ионлари МДД сида асосий ҳиссани «парамагнит» С′ - ҳадлар қўшар экан. МДД нинг 1-ва 2- чизиқлари хусусиятлари $Г_3$, $Г_4 \rightarrow Г_1$ ва $Г_2$, $Г_3 \rightarrow Г_1$ каби икки адсорбцион магнитооптик–фаоллик билан боғлиқ экан. Бу ўтишлар иккита бир-бирига яқин жойлашган қуйида жойлашган $^7F_1$ мультиплет (ташқи магнит майдон орқали «аралашган») штарк синглетларидан Eu^{3+} ионнинг уйғотилган $^5D_0$ мультиплети асосий $4f^{(6)}$-конфигурацияли «яккаланган» синглетига ўтишлари туфайли содир бўлади. 10-расмда келтирилган МДД спектри EuGG намунада Т = 300 К температурада Н = 5,0 кЭ ташқи магнит майдонида кристаллнинг [111] йўналиши бўйлаб ўлчанди.

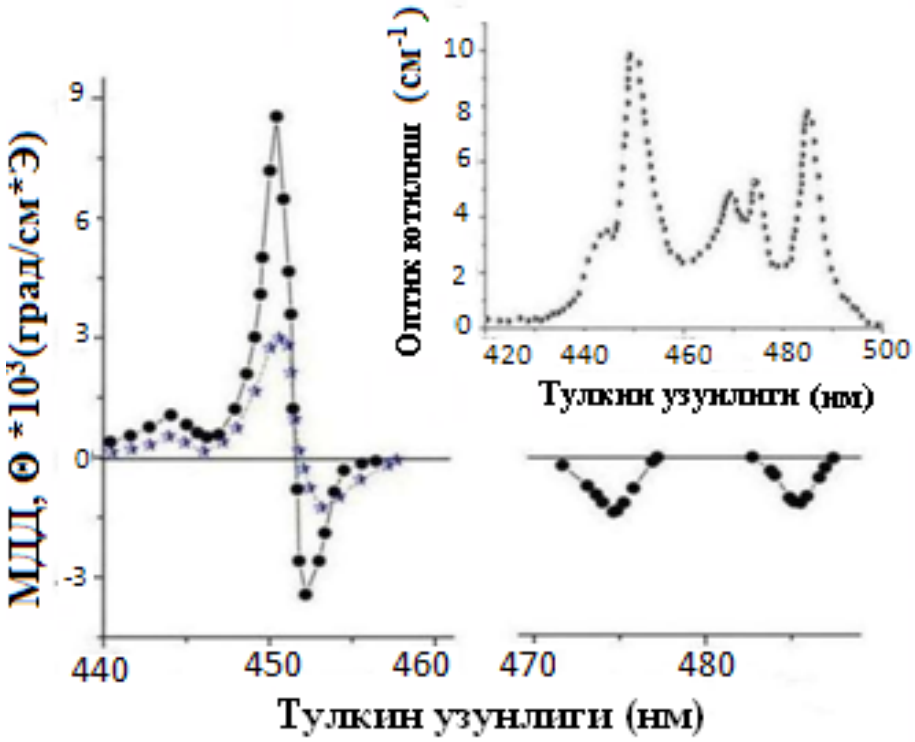
10-расмда 2- индекси билан белгиланган МДД нинг устунлик қилувчи хусусияти $^7F_0(Г_1)$ асосий ҳолатдан $^5D_1$ мультиплетда $Г_3$, $Г_4$ «квазидублет»га ўтиши орқали амалга ошувчи синглет → «квазидублет» ўтишидир.

Ютилиш чизиғи (10-расмда 1- индекси билан белгиланган) кўринишига эга МДД эгри чизиғи ташқи магнит майдони мавжуд бўлган ҳолда $^7F_0$ и $^7F_1$ мультиплетлар штарк системаостиларининг Ван-Флек «аралашиши» билан характерланади.

EuGaG да Ван-Флек «аралашиши» пайдо бўлишининг яна бир тасдиғи унинг моляр магнит сингдирувчанлигини назарий ҳисоблашдир. Ҳисоблаш натижалари 11-расмда кўрсатилгандек $\chi_m(Eu^{3+})$ экспериментал температуравий боғланишни етарлича катта аниқликда ифодалайди. Олинган тажриба натижалари $Gd_3Ga_5O_{12}$ гадолиний – галлийли гранатдаги Eu^{3+} НЕ-ионининг энергетик сатҳини кристалл-майдон ажралиши учун аниқланган худди шундай катталикларга тўла мос келади. $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) ва$Y_3Ga_5O_{12}$ гранатлар монокристалларида $Tb^{3+}(4f^{(8)})$ нодир-ер ионининг оптик ва магнитооптик спектрларини таҳлил қилиш натижасида $Gd_3Ga_5O_{12}$ (12-расм) учун ЛМЦҚ даражасининг спектрал боғланишининг мураккаб кўринишга эгалиги кўрсатиб берилди, бу эса ўз навбатида бир вақтнинг ўзида пайдо бўлувчи $Tb^{3+}(4f^{(8)})$ НЕ-иони $^5D_4$ ва $^7F_5$ мультиплетлари системаостилари ўртасидаги икки магнитооптик-фаол ўтишлар туфайли ҳосил бўлиши мумкинлиги қайд этилди.

«$Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$:5%Pr^{3+} нодир-ер бирикмаларининг парамагнит тартиб сизланиши магнитооптикаси» деб аталадиган олтинчи бобда $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$:5%Pr^{3+} нодир-ер бирикмаларининг парамагнит тартибсизланиши магнитооптик спектрларини тадқиқ қилиш натижалари келтирилган. Олинган экспериментал катталиклардан $^3P_2$ ва $^3P_1$ мультиплетларда магнитооптик-фаол ички конфигурацион 4f→4f ўтишлар (Жад параметр Ω_λ ларига ўхшаш) интенсивлиги $F_\lambda(\lambda$=2,4,6) параметрлари нисбати аниқланди. 13-расмда тадқиқ қилинаётган $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$:5% Pr^{3+} НЕ-бирикмаси кристаллнинг С тригонал ўқи

бўйлаб йўналган ташқи магнит майдонида T=90K ва T=300K температураларда ўлчанган МДД спектрлари келтирилган.



13-расм. T=90 K (-●-) и T=300K (-∗-) температураларда ўлчанган НЕ-бирикмалари $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$:5% Pr^{3+}нинг МДД спектрлари.

$^3H_4 \rightarrow {}^3P_2$ ва $^3H_4 \rightarrow {}^3P_1$ икки ўтишлар учун МДД эгри чизиқлари характерининг турлича бўлиши кўриниб турибди. $^3H_4 \rightarrow {}^3P_1$ (тўлқин узунлиги 475 нм) соҳасида МОФ С-ҳад устунроқ, айни пайтда эса $^3H_4 \rightarrow {}^3P_1$ (тўлқин узунлиги 450 нм) ўтишларда МОФ А-ҳади ҳиссаси ошиқроқ. Бундан ташқари температура пасайганда МДД катталикларининг ўсиши (амалдаги барча кузатиладиган ўтишларда) кузатилди, бу эса МДД даги тартиблашган $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$:5% Pr^{3+} гранатларда МОФ(С-ҳад) «парамагнит» механизми ҳиссаси сезиларли эканлигидан далолат беради.

Нолинчи моментнинг температуравий боғланишидаги формулага кўра:

$$\frac{1}{D}\left(\frac{C}{k_B T} + B\right) = 2{,}14\frac{\langle \Delta A \rangle_0}{\langle A_0 \rangle} \qquad (7),$$

бу ерда B –МДД да «аралашиш» ҳиссаси, k_B - Больцмана доимийси, $\langle \Delta A \rangle_0$ ва $\langle A_0 \rangle$ - мос равишда МДД полосаларидаги нолинчи момент ва оптик ютилиш.

Иккинчи томондан $^3P_2$ ва $^3P_1$ мультиплетлардаги ўтишлар учун парамагнит ҳиссалар нисбати 4f-4f учун Жад параметрлари нисбати F_4: F_6 орқали қуйидаги

$$C(^3P_2)/C(^3P_1) = 3{,}8 + 2{,}6(F_6/F_4) \qquad (8)$$

формулага биноан ифодаланиши мумкин.

ХУЛОСА

«Парамагнит кристалларда нокрамерс Eu^{3+}, Tb^{3+} ва Pr^{3+} ионларининг магнитооптикаси» мавзусидаги физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертациясини бажаришда ўтказилган илмий тадқиқотлар асосида қуйидаги хулосалар келиб чиқди:

1. $Eu_3Ga_5O_{12}$ парамагнит гранат монокристаллидаги ФЭ да «гиромагнит» Верде доимийси $V_{gm}^{(m)}$ = +(0.0038 ± 0.0005) мин/см*Э нинг қиймати ва «гиромагнит» ҳиссаси катталиги тажрибада аниқланди, олинган натижалар назарий ҳисоблашлар натижалари билан таққосланди.

2. $Eu_3Ga_5O_{12}$нинг МДД ва оптик ютилиш спектрларини солиштириш натижасида КП нинг D_2 симметриясидаги Eu^{3+} НЕ-иони энергия сатҳларининг кристалл-майдон ажралишишларининг сонли ҳисоб-китоб катталиклари билан яхши мос келувчи тажрибада топилган граната структурасидаги европий ионининг $^5D_0$, $^5D_1$, $^7F_0$ и $^7F_1$ мультиплетлари Штарк системаостиларининг симметрик идентификацияси амалга оширилди;

3. Т= 90К температурада 542-544нм тўлқин узунлиги интервалида кузатиладиган Tb^{3+}: GGG ва Tb^{3+}:YGG гранатлардаги МЦҚЛ спектрлари хусусиятларини солиштириш спектрнинг УБ соҳасидаги оптик ғалаёнланиш энегиясининг битта Tb^{3+} ионидан бошқасига Gd^{3+} ионининг ғалаёнланган ҳолати воситасида узатилишини аниқлаш имконини берди;

4. Парамагнит нодир-ер бирикмаларининг оптик ва магнитооптик катталикларини солиштириш натижасида энергетик спектрларда «квазидублет» структурага эга Pr^{3+} ва Eu^{3+} нокрамерс ионларидаги «ман қилинган»4f - 4f ўтишлар туфайли пайдо бўлган ютилиш полосаларидаги МДД ва фарадей айланишларининг пайдо бўлиш механизмларида сезиларли ролни $^3H_4$ (Pr^{3+}) асосий мультиплетлари қуйи уч Штарк система остиларининг квантомеханик «аралашиши», шунингдек $^7F_0$ ва $^7F_1$ (Eu^{3+}) мультиплетлари ўйнаши аниқланди.

5. Тажриба йўли билан етарлича катта температура интервалида кубик монокристалл $Eu_3Ga_5O_{12}$нинг [111] ўқи бўйлаб моляр магнит қабул қилувчанлик $\chi_m(Eu^{3+})$ нинг температуравий боғланиши аниқландики, у 1,5-2% аниқлик билан D_2 симметрия кристалл майдонида Eu^{3+} иони кристалл-майдон сатҳи учун тўлқин функциялари тўпламидан фойдаланган ҳолда назарий йўл билан ҳисобланган температуравий боғланишларга мос келади.

6. Биринчи марта EuGG НЕ-гранатида $^7F_0 \rightarrow {}^5D_1$ ўтишнинг магнитодипол характери интерпретациялари гранат структурасидаги Eu^{3+} ионининг $^7F_0$ и $^7F_1$ мультиплетлари Штарк ҳолатлари аралашишини ҳисобга олишга асосланган Т=90К ва Т=300К температуралардаги МДД тадқиқотлари натижалари билан тасдиқланди.

7. Илк маротаба $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$:5% Pr^{3+} тартиблашмаган парамагнит гранатлардаги ичкиконфигурацион 4f→4f $^3H_4 \rightarrow {}^3P_1$(~475нм) и $^3H_4 \rightarrow {}^3P_2$ (~450 нм) ўтишлар билан характерланувчи МДД ва оптик ютилиш спектрларини солиштириш натижасида тажрибада олинган қийматлар асосида $^3H_4 \rightarrow {}^3P_{1,2}$

ўтишлар учун Джадд параметрлари интенсивликлари Ω_λ нисбатининг Ω_6 : Ω_4=2,0 га тенг қиймати аниқланди, тажриба йўли билан уларнинг 0,8β ва -0,7βга тенг C/D аниқландики, айни дамда назарий қийматлар мос равишда -1,5β ва 1,6β ни ташкил қилди.

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

НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА

МАЛЫШЕВА МАРИЯ ЕВГЕНИЕВНА

МАГНИТООПТИКА НЕКРАМЕРСОВСКИХ ИОНОВ Eu^{3+}, Tb^{3+} И Pr^{3+} В ПАРАМАГНИТНЫХ КРИСТАЛЛАХ

01.04.05 – Оптика

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

Ташкент–2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за №B2017.2.PhD/FM68.

Диссертация выполнена в Национальном Университете Узбекистана.

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

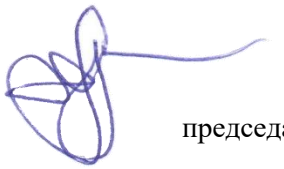
Научный руководитель:	**Валиев Уйгун Вахидович** доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	**Нематов Шерзод Каландарович** доктор физико-математических наук
	Ахмеджанов Фархад Рашидович доктор физико-математических наук, доцент
Ведущая организация:	**Самаркандский государственный университет**

Защита диссертации состоится «____» _____ 2019 года в _____ часов на заседании Научного совета DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий АНРУз.(Адрес: 100125,г.Ташкент, улица Дурмон, д. 33. Тел./факс: (+99871) 262–32–54, e-mail:info@iplt.uz.,зал заседаний Института ионно-плазменных и лазерных технологий).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ионно-плазменных и лазерных технологий (зарегистрирована за №_____). Адрес: 100125, г. Ташкент, улица Дурмон, д. 33. Тел./факс: (+99871) 262-32-54).

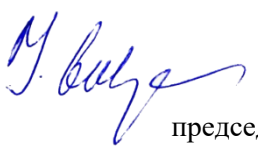
Автореферат диссертации разослан «____» _____ 2019 г.

(реестр протокола рассылки № _____ от «____» _____ 2019 г.).



Х.Б. Ашуров
председатель Научного совета по присуждению ученых степеней, д.т.н., профессор

Д.Т. Усманов
ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник



Б.Е. Умирзаков
председатель научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д. ф.-м.ф., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Современная магнитооптика является частью физики, которая состоит из двух известных научных направлений - физической оптики и физики магнитных явлений. Она охватывает широкий круг проблем, связанных с анизотропией оптических свойств материалов, помещенных во внешнее магнитное поле. На ранних этапах интенсивного развития магнитооптических исследований, начавшегося в 1960-х и 1970-х годах, основное внимание было направлено на создание новых магнитных редкоземельных (РЗ) диэлектриков, характеризующихся значительными магнитооптическими эффектами и высокой прозрачностью в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. Поразительные результаты, полученные в результате проведенных первоначальных исследований быстро привели к возникновению широких возможностей для разработки технических приложений этих магнитооптических эффектов в хорошо известных в настоящее время областях фотоники, оптоэлектроники и микроэлектроники. Кроме того, существует значительный интерес к фундаментальным исследованиям магнитооптики редкоземельных магнитных диэлектриков, поскольку они дают возможность решать фундаментальные проблемы физики магнитных явлений в твердых телах.

За последние 10-15 лет появилось большое количество публикаций, посвященных изучению оптических, магнитных и магнитооптических характеристик парамагнитных монокристаллов гранатов – галлатов $R_3Ga_5O_{12}$ (RGaG) и алюминатов $R_3Al_5O_{12}$ (RAG), легированных трехвалентными редкоземельными ионами Eu^{3+},Tb^{3+}и Pr^{3+}. Намагничивание кристаллов гранатов, активируемых этими ионами (например, Tb^{3+}), вызывает в ряде случаев значительные (обычно от 50% до 100%) изменения их оптических характеристик, по сравнению со спектрами, полученными с использованием стандартных немагнитных спектроскопических методов. Известно, что магнитные свойства подобных РЗ-соединений определяются симметрией и видом волновых функций самых нижних подуровней основных мультиплетов некрамерсовских РЗ-ионов.В тоже время, величина магнитооптической активности таких известных магнитооптических эффектов, как эффект Фарадея (ЭФ), магнитная циркулярная поляризация люминесценции (МЦПЛ), магнитный круговой дихроизм (МКД) в существенной степени определяется вкладом возбужденных мультиплетов этих некрамерсовских РЗ-ионов в кристаллах гранатов. Но в настоящее время практически отсутствуют какие-либо данные экспериментальных исследований о структуре энергетического спектра некрамерсовских РЗ-ионов Eu^{3+}, Tb^{3+} и Pr^{3+}, допированных в матрицу гранатов-галлатов и -алюминатов, где они подвергаются воздействию со стороны низкосимметричного кристаллического поля симметрии D_2. Кроме того мало изучены микроскопические механизмы возникновения магнитооптической активности в парамагнитных гранатах, связанные с учетом т.н. «квазидублетной» структуры основных мультиплетов исследуемых РЗ-ионов.

На сегодняшний день, в соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан по пяти приоритетным направлениям на 2017–2021 гг.[2] определены цели и задачи по стимулированию научно-исследовательской деятельности, создание эффективных механизмов внедрения научных и инновационных достижений в практику, создание при высших образовательных учреждениях и научно-исследовательских институтах научно-экспериментальных специализированных лабораторий, центров высоких технологий, технопарков. В связи с этим уделяется большое внимание научно-экспериментальным методам исследования, к которым относятся методы оптической и магнитооптической спектроскопии РЗ-соединений. Данные методы исследования привлекают внимание исследователей не только Узбекистана, но и представителей научных центров по развитию высоких технологий различных стран мира.

Результаты исследований, полученные в данной диссертационной работе позволяют поднять престиж научно-исследовательской деятельности Республики Узбекистан. Поэтому данное диссертационное исследование в определённой степени соответствует задачам, обозначенным Указом Президента Республики Узбекистан №УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы» от 7 февраля 2017 года, №ПП-3682 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения иновационных идей, технологий и проектов» от 27 апреля 2018 года, №ПП-3698 «О дополнительных мерах по совершенствованию механизмов внедрения инноваций в отрасли и сферы экономики» от 7 мая 2018 года, а также в других нормативно-правовых документах имеющих отношение к данной области деятельности.

Соответствие исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике Узбекистан: II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

Степень изученности проблемы. На сегодняшний день в научном мире присутствует значительный интерес к фундаментальным исследованиям магнитооптики редкоземельных магнитных диэлектриков, поскольку они дают возможность решать фундаментальные проблемы физики магнитных явлений в твердых телах. Из-за высокой чувствительности магнитооптических эффектов (по сути дифференциальных) к внешним физическим воздействиям эти исследования позволяют получить важную и уникальную информацию, которую нельзя получить другими физическими методами, традиционно используемыми для изучения электронной структуры, энергетических спектров и волновых функций редкоземельных соединений. Очевидными преимуществами этого подхода, являются относительно простые методы моделирования и расчета, которые доступны для интерпретации магнитооптических спектров некрамерсовских

[2]Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию РеспубликиУзбекистанна 2017–2021 годы» от7 февраля 2017 г.

РЗ-ионов Eu^{3+}, Tb^{3+} и Pr^{3+}, допированных в матрицу гранатов галлатов (RGaG) и алюминатов (RAG). За последние 10-15 лет появилось большое количество публикаций, посвященных магнитооптике и оптике редкоземельных соединений. Также в современной научной литературе имеется достаточное количество работ, содержащих экспериментальные данные по круговой магнитооптической анизотропии этих соединений с использованием последних разработок в теории кристаллического поля и в теории интенсивностей внутри конфигурационных (4f→4f) и межконфигурационных (4f → 5d) электронных переходов. Кроме того, первые успешные применения микроскопической теории к объяснению магнитооптических явлений в РЗ-соединениях были осуществлены ещё в конце XX века учеными различных стран мира. К ним можно отнести, открытие нового микроскопического механизма возникновения магнитооптической активности (МКД,МЦПЛ,ЭФ) связанного со «смешиванием» внешним магнитным полем *H* состояний близлежащих штарковских синглетов некрамерсовского РЗ-иона структуре граната, что позволило дать непротиворечивое объяснение рекордным значениям магнитооптических эффектов, наблюдаемым в ряде кристаллов гранатов активированных ионами Tb^{3+} и Pr^{3+}. Однако, детальное рассмотрение природы возникновения рекордных магнитооптических эффектов требует решения ряда задач по теории возмущений (с учётом «смешивания» волновых функций) и установления правил отбора (по симметрии) для комбинирующих в магнитооптически-активных 4f → 4fпереходах состояний некрамерсовских РЗ-ионов Eu^{3+} , Tb^{3+} и Pr^{3+}. Кроме того, как отсутствие информации об энергетическом спектре мультиплетов основной $4f^{(n)}$-конфигурации некрамерсовских РЗ-ионов Eu^{3+}, Tb^{3+} и Pr^{3+} в низкосимметричных кристаллических полях D_2 симметрии, так и недостаточные знания о механизмах возникновения магнитооптических эффектов в парамагнитных кристаллах с учетом «квазидублетной» структуры основных мультиплетов исследуемых РЗ-ионов, и явились основополагающими моментами для постановки данной исследовательской работы. В связи с этим, в данной диссертационной работе была поставлена задача экспериментального и теоретического исследования влияния особенностей штарковского расщепления энергетических спектров некрамерсовских РЗ- ионов в низкосимметричном кристаллическом поле симметрии D_2 в структуре гранатов $R_3Ga_5O_{12}$ и $R_3Al_5O_{12}$ на их оптические и магнитооптические свойства.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Тема диссертационной работы непосредственно связана с фундаментальными исследованиями, проводимыми в настоящее время в НУУз по госбюджетной теме: «Оптические исследования конденсированных сред». Часть результатов получена при выполнении научных проектов Национального Университета Узбекистана по темам: ОТ-Ф2-064 « Исследование внутрицентровых переходов в оксидах переходных и редкоземельных соединений оптическими и магнитооптическими методами» (2007-2011); ОТ-Ф2-09 «Физические основы механизмов влияния и оптических

ионизирующих излучений на спектральные характеристики многокомпонентных оксидных кристаллов» (2017-2020).

Целью исследования является проведение экспериментальных и теоретических исследований магнитооптических, магнитных и оптических свойств иттрий-алюминиевых, допированных некрамерсовскими ионами Pr^{3+} и гадолиний–галлиевых, допированных некрамерсовскими ионами Eu^{3+} и Tb^{3+} кристаллов гранатов и механизмов возникновения магнитооптических эффектов в парамагнитных кристаллах.

Задачи исследования:

теоретический рассчет величины гиромагнитной константы Верде V из эффекта Фарадея (ЭФ) в монокристалле парамагнитного граната $Eu_3Ga_5O_{12}$(EuGG) и сравнение с результатами, полученными экспериментально;

сопоставление измеренных спектров оптического поглощения и магнитного кругового дихроизма (МКД), а также спектров люминесценции и магнитной циркулярной поляризации люминесценции (МЦПЛ) некрамерсовских ионов Eu^{3+}, Tb^{3+} и Pr^{3+} в монокристаллах парамагнитных гранатов в ближней ультрафиолетовой и видимой области спектра при температурах 90К и 300К;

экспериментальное исследование и теоретический рассчет величины магнитной восприимчивости монокристалла парамагнитного граната $Eu_3Ga_5O_{12}$(EuGG);

теоретическое и экспериментальное подтверждение магнитодипольного характера перехода $^7F_0 \rightarrow {}^5D_1$ с учётом вклада смешивания мультиплетов $^7F_0$ и $^7F_1$ под действием внешнего магнитного поля;

экспериментальное исследование и анализ спектров МКД с целью получения информации о параметрах интенсивностей магнитооптически-активных внутриконфигурационных 4f→4f переходов $F_\lambda(\lambda=2,4,6)$, подобных Джаддовским Ω_λ параметрам величины магнитооптической активности неупорядоченного парамагнитного кристалла $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$: 5%Pr^{3+}.

Объектами исследования являются монокристаллы парамагнитных гранатов $Gd_3Ga_5O_{12}$(GGG), $Y_3Ga_5O_{12}$(YGG), $Y_3Al_5O_{12}$(YAG),$Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$, допированные некрамерсовскими ионами $Eu^{3+}(4f^6)$, $Tb^{3+}(4f^8)$ и $Pr^{3+}(4f^2)$, а также монокристалл $Eu_3Ga_5O_{12}$(EuGG).

Предметом исследования является установление основных механизмов возникновения магнитооптических эффектов в парамагнитных кристаллах, определение более точной структуры энергетических спектров и проведение симметрийной идентификации волновых функций близкорасположенных штарковских подуровней возбужденных мультиплетов основного состояния $4f^{(n)}$-электронной конфигурации некрамерсовских ионов Eu^{3+}, Tb^{3+} и Pr^{3+} в монокристаллах парамагнитных гранатов на основе использования результатов магнитооптических, оптических и магнитных исследований.

Методы исследований. Магнитные, спектрально-люминесцентные и магнитооптические методы исследования спектров поглощения, флуоресценции, магнитного кругового дихроизма (МКД) и магнитной циркулярной поляризации люминесценции (МЦПЛ); метод модулированной

поляризации светового потока, выходящего из намагниченного образца; метод синхронного детектирования, использованный в электронной схеме регистрации вышедшего из оптической схемы сигнала; математические и вычислительные методы обработки экспериментальной информации и др.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые была экспериментальным образом получена величина «гиромагнитного» вклада и значение «гиромагнитной» константы Верде в ЭФ монокристалла парамагнитного граната $Eu_3Ga_5O_{12}$ и было произведено сравнение полученного значения с результатами теоретического рассчета;

входе анализа данных оптических и магнитооптических исследований парамагнитных редкоземельных соединений было установлено, что в механизме возникновения магнитооптических эффектов на полосах поглощения, обусловленных «запрещенными» 4f→4f переходами в некрамерсовских ионах Pr^{3+} и Eu^{3+}, имеющих «квазидублетную» структуру в энергетических спектрах, существенную роль играет эффект квантово-механического «смешивания»;

впервые, используя набор волновых функций для кристалл-полевых уровней иона Eu^{3+} в кристаллическом поле D_2 симметрии, была теоретически рассчитана температурная зависимость молярной магнитной восприимчивости $\chi_m(Eu^{3+})$ вдоль оси [111] кубического монокристалла $Eu_3Ga_5O_{12}$ в широком интервале температур, что хорошо согласуется с температурной зависимостью, полученной экспериментально;

впервые магнитодипольный характер перехода $^7F_0 \rightarrow {}^5D_1$ в РЗ-гранате EuGG подтвержден результатами исследований МКД при Т=90К и Т=300К, интерпретация которых базируется на учете смешиваний состояний Штарковских мультиплетов $^7F_0$ и $^7F_1$ иона Eu^{3+} в структуре граната;

в результате исследования магнитооптических спектров неупорядоченных парамагнитных соединений $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$:5%Pr^{3+}, из полученных экспериментальных данных было найдено отношение параметров интенсивностей магнитооптически-активных внутриконфигурационных 4f→4f переходов и была теоретически рассчитана величина их магнитооптической активности.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

создание на базе полученных оптических и магнитооптических свойств РЗ-гранатов различных магнитооптических устройств, таких как: модуляторы светового излучения, оптические изоляторы, дисплеи, функционирующих в видимой и УФ-областях спектра;

использование исследованных РЗ-соединений в качестве активных сред в квантовых усилителях и генераторах микроволнового диапазона с использованием стандартной оптической накачки;

использование РЗ-ионов в качестве оптических центров, участвующих в передаче возбуждения в эффекте так называемой «квантовой нарезки», который осуществляется в различных фосфорах, легированных примесными РЗ-ионами.

Достоверность результатов исследования заключается в возможности сопоставления экспериментальных данных с данными, полученными с

помощью других методов регистрации, а также в возможности сравнения экспериментальных результатов с теоретическими расчетами. Обосновывается проведением параллельных измерений и сопоставлением данных других исследователей, использованием современных методов регистрации и обработки спектральных зависимостей при проведении магнитооптических исследований.

Научная и практическая значимость результатов исследования заключается в возможности сопоставления результатов оптических и магнитооптических исследований, в получении информации о симметрии волновых функций основного и возбужденных состояний некрамерсовских РЗ-ионов в парамагнитных кристаллах. А также, в возможности на микроскопическом уровне описать основные механизмы магнитооптической активности ионов Eu^{3+}, Tb^{3+} и Pr^{3+} в монокристаллах гранатов (галлатов и алюминатов), что является весьма актуальным с точки зрения прикладных применений и развития фундаментальных представлений о физических механизмах, ответственных за оптические и магнитооптические свойства РЗ-магнетиков.

Практическая значимость результатов исследования определяется тем, что углубленные фундаментальные исследования в области магнитооптики весьма важны, поскольку в настоящее время разрабатывается все больше магнитооптических устройств для их использования во многих оптических и смежных технических приложениях.

Внедрение результатов исследования. На основе магнитооптических свойств монокристаллов гранатов (галлатов и алюминатов), содержащих ионы Eu^{3+}, Tb^{3+} и Pr^{3+}:

магнитоптические результаты, т.е. магнитооптика ионов Tb^{3+} в структуре гадолиний – галлиевого граната, а также методические разработки особенностей наблюдения и измерения магнитооптических эффектов в кристаллах с применением метода модулированной поляризации были использованы компанией «Технодизайн-консалтинг» при производстве магнитооптических материалов в части, относящейся к магнитооптике ионов Tb^{3+} в разных кристаллических матрицах (Письмо российской компании «Техно-дизайн консалтинг №10/04-19 от 15 мая 2019 года). Использование полученных результатов дало возможность существенного увеличения магнитооптической активности выращиваемых кристаллов иттрий-алюминиевого граната, допированных ионами Eu^{3+}, Tb^{3+};

результаты, полученные по спектрам поглощения на внутри конфигурационных переходах в европий – галлиевом гранате были использованы зарубежными исследователями (ссылки в международных журналах: Journal of Rare Earths, Vol 30, №10, 2012, IF:2,524; Journal of Rare Earths,Vol 30, №12, 2015,IF:2,524; Journal of Applied Physics,114,163521, 2013; IF:1,82; Journal of Luminescence, 2015, IF:1,40; Coordination Chemistry Reviews, 295, 2015, IF:4,87) для интерпретации энергетического спектра и расчета волновых функций энергетических уровней РЗ- ионов в кристаллических структурах. Использование полученных результатов позволило определить

энергетическую структуру $4f^6$ конфигурации иона Eu^{3+}, рассчитать интенсивность внутриконфигурационных переходов и показать изменение кристаллической структуры европий–галлиевого граната при изменении давления.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования обсуждены на 6 международных и республиканских конференциях.

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 9 научных статей, 3 из них в международных научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертации доктора философии(PhD).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 129 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении аргументируется актуальность темы исследования, формируются цели и задачи исследования, характеризуются объект и предмет, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, излагаются научная новизна и практические результаты исследования, раскрываются научная и практическая значимость, внедрение в практику полученных результатов. Описана структура диссертации и приведена информация о количестве опубликованных работ по теме диссертационного исследования.

В первой главе диссертации **«Магнитооптические свойства и кристаллографическая структура редкоземельных парамагнитных гранатов»** рассматриваются: магнитные, оптические и магнитооптические свойства, кристаллографическая структура редкоземельных гранатов галлатов и алюминатов. Рассмотрены основные положения теории Джадда-Офельта для запрещенных внутриконфигурационных переходов в энергетическом спектре РЗ-ионов, находящихся в кристаллическом поле низкой симметрии. На основе анализа литературных сведений по магнитооптике РЗ-соединений, подробно описаны известные механизмы возникновения магнитооптической активности данных объектов исследования (ЭФ,МЦПЛ,МКД). Дан краткий обзор экспериментальных и теоретических работ, имеющих отношению к теме диссертационного исследования.

Во второй главе «**Методики измерений и экспериментальные установки»** приведено описание экспериментальных установок и методик, необходимых для проведения оптических, магнитных и магнитооптических исследований. Дан анализ погрешностей измерений, приведены характеристики исследованных образцов.

Монокристаллы парамагнитных гранатов $Gd_3Ga_5O_{12}$(GGG), $Y_3Ga_5O_{12}$(YGG), $Y_3Al_5O_{12}$(YAG), $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$, допированные некрамерсовскими ионами $Eu^{3+}(4f^8)$, $Tb^{3+}(4f^8)$ и $Pr^{3+}(4f^2)$, а также монокристалл

$Eu_3Ga_5O_{12}$(EuGG) были выращены с помощью метода спонтанной кристаллизации из «раствора в расплаве» (высокотемпературный метод Чохральского) в Проблемной лаборатории магнетизма МГУ Б.В. Миллем (г. Москва). Образцы рентгенографическим методом были ориентированы в кристаллографических плоскостях (111) и (110), соответственно.

При проведении оптических, магнитооптических исследований использовались следующие экспериментальные установки:

1)Установка для измерения спектров МКД и МЦПЛ

2) Установка для измерения спектров люминесценции

3) Установка для измерения магнитных свойств РЗ-соединений: вибромагнетометр с колеблющимся образцом.

4) Установка для измерения спектров оптического поглощения: дифракционный однолучевой спектрофотометр, выполненный на базе монохроматора МДР-23 с непрерывной регистрацией сигнала оптической плотности ***D***.

5)Установка для измерения эффекта Фарадея.

В третьей главе «**Магнитооптика магнито-дипольных переходов в редкоземельных парамагнитных гранатах»** приводятся результаты исследования вклада магнитодипольных переходов в магнитооптику (ЭФ и МКД) монокристалла парамагнитного граната $Eu_3Ga_5O_{12}$(EuGG). На рис.1 представлена спектральная зависимость эффекта Фарадея (ЭФ) монокристалла парамагнитного граната $Eu_3Ga_5O_{12}$(EuGG), измеренная при температуре 300K в диапазоне длин волн 500 ÷ 800 нм (а также, на лазерных длинах волн 632.8 нм и 1150 нм) в постоянном магнитном поле H=9,0 кЭ в кристаллографическом направлении [111] (вставка рис.1). Согласно результатам проведенных исследований, спектральная зависимость постоянной Верде $V(Eu^{3+})$ трехвалентных редкоземельных (РЗ) ионов европия в диапазоне световых частот, удаленных от резонансных частот разрешенных 4f→5d переходов может быть представлена следующим выражением:

$$V(Eu^{3+}) = \frac{K}{\lambda^2 - \lambda_0^2} + V_{gm}^{(m)} \qquad (1)$$

где первый член описывает вклад в фарадеевское вращение магнитооптически-активных электродипольных (ЭД) переходов в EuGG, а λ_0= 250 нм – т.н. «эффективная» длина волны разрешенных ЭД переходов происходящих в ионах Eu^{3+} в структуре граната, т.н. «гиромагнитный» ЭФ. Второй член $V_{gm}^{(m)}$ представляет собой независящий от длины волны λ вклад в фарадеевское вращение магнитооптически-активных магнитодипольных (МД) переходов. Согласно выражению (1), величина «гиромагнитного» вклада в ЭФ $V_{gm}^{(m)}$ может быть найдена из экстраполяции линейной зависимости $V \sim 1/(\lambda^2 - \lambda_0^2)$ к оси ординат (см. рис.1). Найденное таким образом из экспериментальных данных значение «гиромагнитной» константы Верде $V_{gm}^{(m)}$ оказалось равным $V_{gm}^{(m)}$ =+(0.0038 ± 0.0005) мин/см*Э при T=300 K.

Помимо экспериментального исследования спектральной зависимости ЭФ, нами был произведен теоретический расчет выражения, описывающего «гиромагнитный» эффект Фарадея. В результате общее выражение для магнитодипольного ЭФ монокристалла парамагнитного граната $Eu_3Ga_5O_{12}$(EuGG) в спектральной области $\omega^2 >> \omega_{a,b}^2$ (частота падающей электромагнитной волны ω намного больше резонансной частоты МД переходов ω_{ab}) для области температур T≠0,можно записать в виде:

$$\alpha_F^{(m)}(Eu^{3+}) = \frac{2\pi\pi}{c}\left(\frac{g_1 e}{mc}\right)\cdot[\chi - \frac{1}{2}(\chi_1 + \chi_2)]H = \frac{2\pi\pi}{c}\left(\frac{g_1 e}{mc}\right)\cdot\chi'' H \qquad (2)$$

Результирующая восприимчивость ионов Eu^{3+} в кристалле граната обычно представляется в виде аддитивной суммы вкладов χ_1, χ_2 и $\Delta\chi_{VV}^{(0)}$:

$$\chi = (\Delta\chi^{(0)}{}_{VV} + \chi_1 + \chi_2) \qquad (3),$$

χ_1 и χ_2 – парциальные магнитные восприимчивости, обусловленные термической заселенностью зеемановских подуровней мультиплетов $J_1 = 1$ и $J_2 = 2$ ионов Eu^{3+}; $\Delta\chi^{(0)}{}_{VV}$ – Ван-Флековский вклад в восприимчивость, обусловленный «смешиванием» во внешнем поле волновых функций мультиплетов $^7F_0$ и $^7F_1$; $g_1=g_2=1{,}5$ – факторы Ланде мультиплетов $J_1=1$ и $J_2=2$; $\Delta_1 \approx 350$ cm^{-1}; $\Delta_2 \approx 10^3$ cm^{-1}. Таким образом, температурная зависимость независящей от частоты «гиромагнитной» постоянной Верде $V_{gm}^{(m)}$ в парамагнитных соединениях, легированных ионами Eu^{3+} не определяется аналогичной зависимостью магнитной восприимчивости χ(T) ионов Eu^{3+},

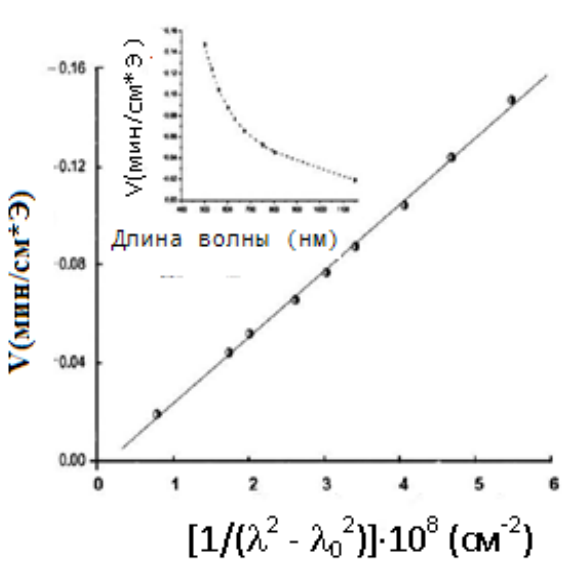


Рис.1. Функциональная зависимость $V(Eu^{3+}) = \frac{K}{\lambda^2 - \lambda_0^2} + V_{gm}^{(m)}$ **. На вставке: спектральная зависимость константы Верде *V* (Eu^{3+}), измеренной при T=300К.**

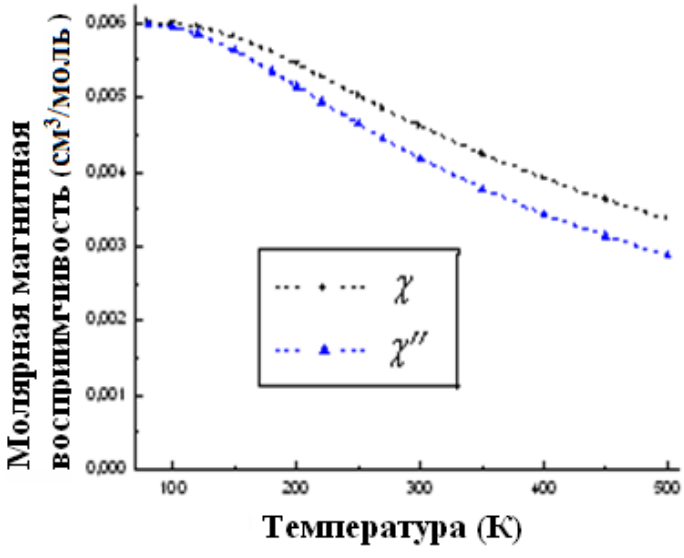


Рис.2. Сравнение вычисленных значений $\chi(T)$ и $\chi''(T)$ в интервале температур 85÷500К.

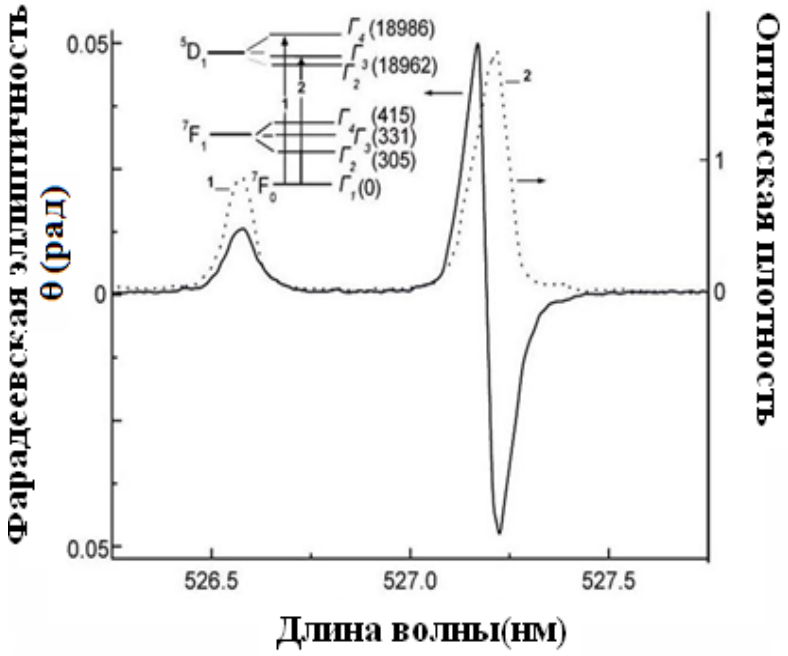


Рис.3.Спектр поглощения (пунктирная линия)и МКД(сплошная) EuGG, записанный на полосе поглощения $^7F_0 \rightarrow {}^5D_1$ в поле H=6.2кЭ при T=85K.

особенно в области температур выше 100 K, что хорошо видно из графического сопоставления температурных зависимостей $\chi(T)$ и $\chi''(T)$, вычисленных из выражений (3) и (2) и приведенных на рис.2.

Найденное из экспериментальных данных значение «гиромагнитной» константы Верде $V_{gm}^{(m)}$ оказалось равным $V_{gm}^{(m)}$=+(0.0038±0.0005) мин/см*Э при T = 300 K. Это значение хорошо согласуется по величине с теоретически вычисленным значением из выражения (4), описывающего «гиромагнитный» эффект Фарадея, и равным $V_{gm}^{(m)}$=+0.0041 мин/см*Э.

На рис.3 представлены спектры поглощения (пунктирная линия) и МКД (сплошная), записанные на полосе поглощения $^7F_0 \rightarrow {}^5D_1$ в поле H=6.2кЭ при T =85K. Из анализа полученных спектральных зависимостей следует, что вклад Ван-Флековского «смешивания» (*B*-вклад) в МКД монокристалла EuGG, обусловлен переходами из «смешиваемых» полем H состояний Γ_1 ($^7F_0$), Γ_2 ($^7F_1$) и Γ_1($^7F_0$), Γ_3($^7F_1$) на изолированное синглетное состояние Γ_4 мультиплета $^5D_1$ (рис.3). В то же самое время, доминирующий пик МКД наблюдаемый при 527.2 нм на рис.3 имеет характерную S-образную форму, подобную первой производной от линии поглощения, и представляет собой переход типа «синглет→квазидублет» из основного состояния Γ_1 ($^7F_0$) на «квазидублет» Γ_2, Γ_3 мультиплета $^5D_1$. Появление *B* – члена в спектре МКД на линии поглощения 526.6 нм подтверждается вычислением отношения *B/D* методом моментов МКД, которое однозначно характеризует магнитооптическую активность (МОА) редкоземельного (РЗ) иона, обусловленного «смешиванием» электронных состояний внешним магнитным полем *H*. Используя известные квантово-механические выражения, отношение *B/D* для «смешанного»

состояния, сформированного из штарковских подуровней J_0 и J_1 = (J_0+1) мультиплетов иона Eu^{3+} отношение может быть представлено как:

$$\frac{B}{D} = \frac{2S_m^2}{6{,}25\Delta_1} \cdot 2g_1 = \frac{1.28}{\Delta_1} \cdot 2g_1 \qquad (4),$$

где $S_m = -2\sqrt{1-m^2} = -2$ для иона Eu^{3+}. При использовании метода моментов МКД, величина отношения может быть представлена следующим образом:

$$\frac{B}{D} = 2.14\frac{<\Delta A/H>_0}{<A>_0} (5), <A>_0 = <A>_0^{(1)} \rho_0(300) + <A>_0^{(3)} + <A>_0^{(4)} \qquad (5)$$

где $<A>_0^{(1)}$ - нулевой момент оптической поглощательной способности линии поглощения при 526.6 нм (рис. 3), измеренной при T=85K; $\rho_0(300)$ - больцмановская заселенность штарковского подуровня $\Gamma_1(^7F_0)$ при T=300 K; а $<A>_0^{(3)}$ и $<A>_0^{(4)}$ нулевые моменты линий поглощения *3* и *4* на рис. 4.

$$<\Delta A/H>_0 = <\Delta A/H>_0^{(1)} \left[\rho_0(300) - \rho_1(300)\right] \qquad (6)$$

где $<\Delta A/H>_0^{(1)}$ - нулевой момент магнитооптической поглощательной способности (МКД) при 526.6 нм (рис.3), измеренный при T = 85K, и $\rho_1(300)$ - больцмановская заселенность штарковского подуровня $\Gamma_2(^7F_1)$ при T = 300 K. Тогда экспериментально определенное значение для параметра $2g_1$ в выражении (5) становится равным 3.42. Это значение находится в разумном соответствии с теоретическим значением параметра $2g_1$=3.0, фигурирующим в выражении для «гиромагнитного» эффекта Фарадея в ионах Eu^{3+}, что и подтверждает магнитодипольный характер перехода $^7F_0 \rightarrow {}^5D_1$ в РЗ-гранате EuGG.

В четвертой главе «**Магнитный круговой дихроизм ионов Pr^{3+} в кристаллах иттрий-алюминиевого граната.»** приведены спектры поглощения и МКД парамагнитного кристалла Pr^{3+}:YAG.

Спектры магнитооптического поглощения Pr^{3+}:YAG измерялись при температурах T = 90K и 300K в УФ-области спектра в интервале длин волн 220 ÷ 320 нм (570 ч 31250cm^{-1}) и в видимой области спектра на длинах волн 486 ÷ 489 нм (20450 ч 20580cm^{-1}) и 608 ÷ 612 нм (16340 ч 16450 cm^{-1}). Спектральная зависимость МКД на переходе $^3H_4 \rightarrow {}^3P_0$ (линии 1 и 2) (рис.3) совпадает с аналогичной зависимостью линий поглощения (рис.4). При понижении температуры до 90K, линии МКД сужаются и растут по амплитуде, но при этом их площади остаются практически неизменными (рис.5). Анализ температурного поведения спектров МКД, измеренных на линиях -1 и -2 в полосе поглощения $^3H_4 \rightarrow {}^3P_0$ при T = 90K и 300K однозначно указывает на то, что данные особенности обусловлены вкладом в МКД механизма «смешивания» волновых функций самых нижних штарковских синглетов основного $^3H_4$ мультиплета иона Pr^{3+} внешним магнитным полем H – т.н. B-член МКД. Так как, величины B-членов полосы 1 и 2 МКД (противоположные по знаку) должны определяться только соотношением больцмановских

заселенностей (при заданной температуре) штарковских синглетов Γ_3 и Γ_4 основного мультиплета $^3H_4$, лежащих при энергиях 0,0 см$^{-1}$ и 50 см$^{-1}$, соответственно, то отношения населенностей рассматриваемых подуровней при Т=90К и 293К равны, соответственно $\rho_{\tilde{A}_3}(300K):\rho_{\tilde{A}_4}(300K)=1{,}27$, и $\rho_{\tilde{A}_3}(90K):\rho_{\tilde{A}_4}(90K)=2{,}04$. Учитывая, что абсолютная величина В-члена определяется площадью полосы МКД, находим из экспериментальных данных (рис.5), что отношения нулевых моментов (или площадей) особенностей МКД -1 и -2 на полосе поглощения $^3H_4 \rightarrow {}^3P_0$ при Т=90К и 300К равные, соответственно: $<\theta_0^{(1)}(300K)>:<\theta_0^{(2)}(300K)>=1{,}25$ и $<\theta_0^{(1)}(90K)>:<\theta_0^{(2)}(90K)>=2{,}0$, хорошо согласуются по величине с теоретическими предсказаниями. Сложную структуру спектра МКД на полосе поглощения $^3H_4 \rightarrow {}^1D_2$ можно объяснить

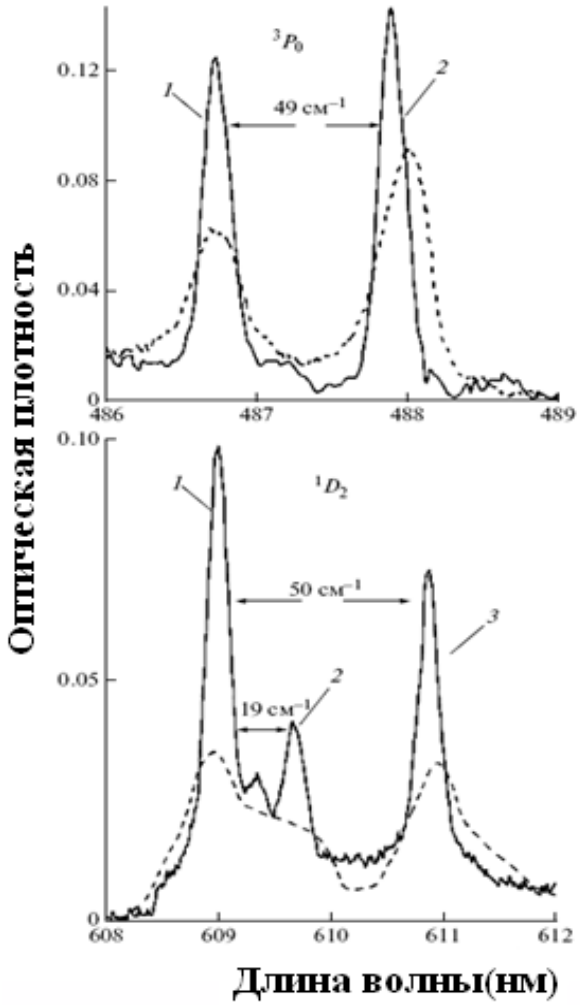


Рис.4.В верхней и нижней частях рисунка приводятся спектры поглощения Pr^{3+}:YAG, записанные в полосах поглощения $^3H_4 \rightarrow {}^3P_0$ и $^3H_4 \rightarrow {}^1D_2$ при Т = 90К (сплошная линия) и 293К (пунктир).

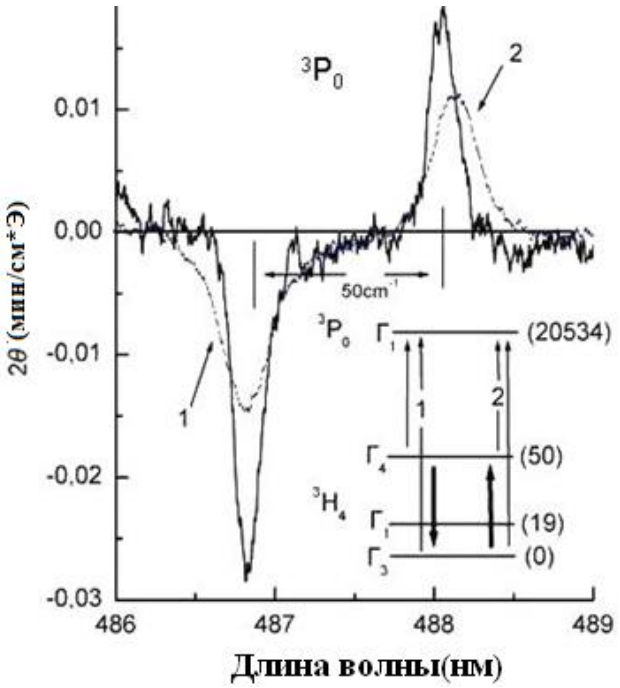


Рис.5. Спектры МКД в Pr^{3+}:YAG, записанные в полосе поглощения $^3H_4 \rightarrow {}^3P_0$ при Т = 90К (сплошная линия) и 293К (пунктир) при ориентации внешнего магнитного поля Н = 10кЭ вдоль кристаллографического направления [110].

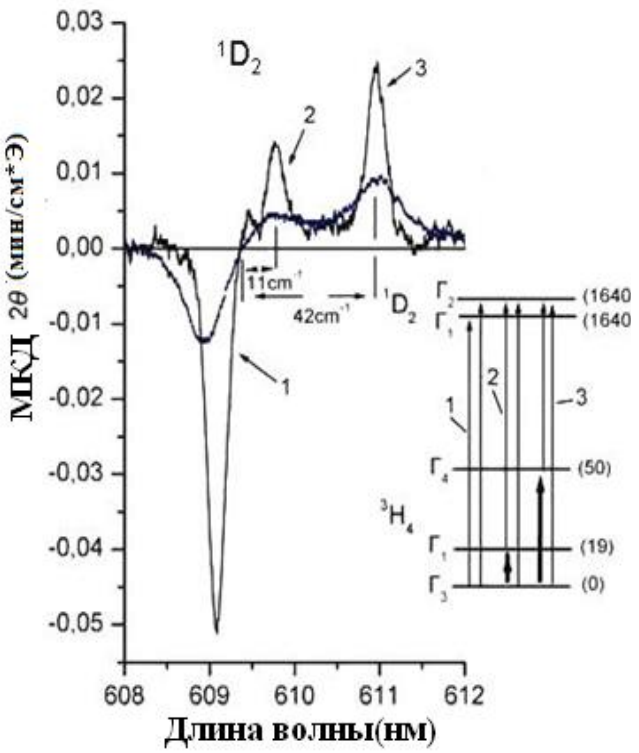


Рис.6. Спектры МКД в Pr^{3+}:YAG, записанные в полосе поглощения $^3H_4 \rightarrow {}^1D_2$ при Т=90К (сплошная линия) и 293К (пунктир) при ориентации внешнего магнитного поля Н=10кЭ вдоль кристаллографического направления [110].

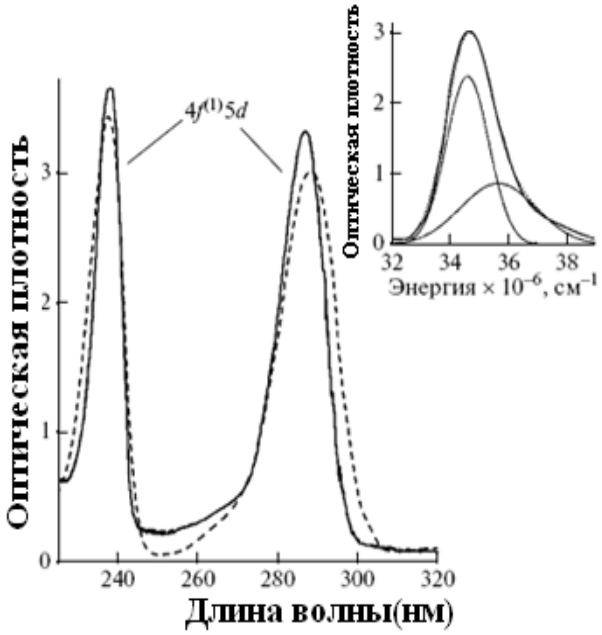


Рис.7. Спектры интенсивного УФ-поглощения в Pr^{3+}:YAG, записанные при Т=90К (сплошная линия) и 293К (пунктир).

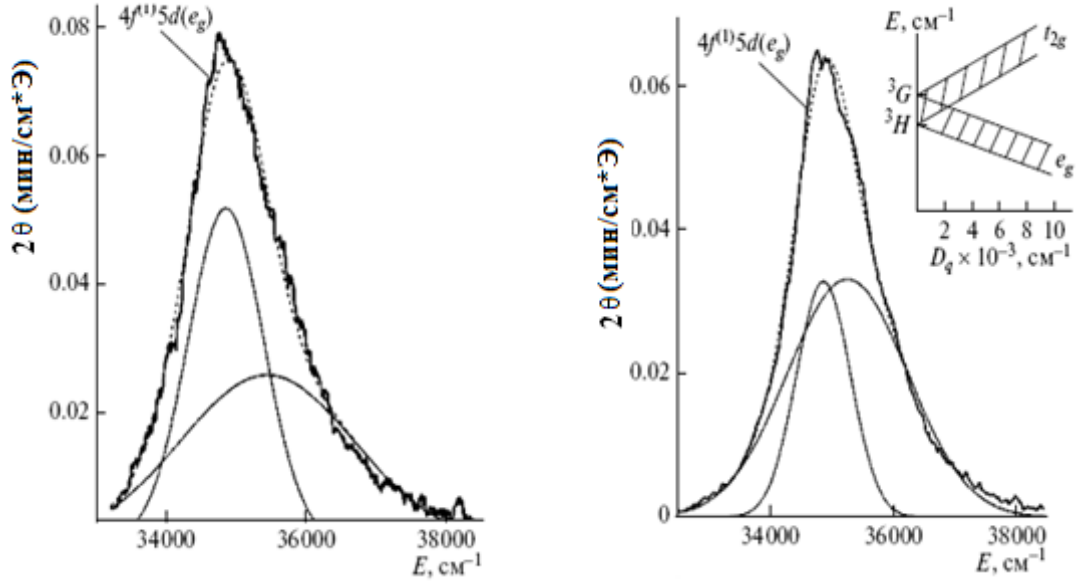


Рис.8. Сплошными линиями показаны спектры МКД в Pr^{3+}:YAG, записанные при T = 90 (левый рис.) и 300 К (правый рис.) в окрестности полосы поглощения при 288 нм при ориентации внешнего поля H = 10 кЭ вдоль кристаллографического направления [110].

доминирующим вкладом в МКД в данной области спектра т.н. А - члена МКД («диамагнитный» член МКД) некрамерсовского РЗ-иона Pr^{3+} (рис.6).

В результате анализа данных оптических и магнитооптических исследований празеодим-иттриевого граната-алюмината, полученных в УФ-области спектра в интервале длин волн 260–310 нм (см. рис. 7 и 8) можно утверждать, что основной вклад в МКД при низких *T* будут давать переходы с термически заселяемых подуровней Γ_3 (0.0 $см^{-1}$) и Γ_1 (19 $см^{-1}$) основного «квазитриплета» основного мультиплета $^3H_4$ иона Pr^{3+}, волновые функции которых эффективно (вследствие небольшого энергетического интервала между ними) «смешиваются» внешним полем *H*. Что же касается вклада в МКД, обусловленного Ван-флековским «подмешиванием» составляющих гауссова типа состояний основного синглета Γ_3 к состояниям синглета Γ_4 (50 $см^{-1}$), то в согласии с экспериментальными данными величина этого вклада уменьшается с понижением температуры.

Таким образом, мы можем сделать вывод о том, что в механизме возникновения МКД на полосах поглощения как в видимой, так и в УФ-области спектра, обусловленных «запрещенными» 4f→4f переходами в ионах Pr^{3+} в структуре иттрий-алюминиевого граната, существенную роль играет эффект квантово-механического «смешивания» состояний трех нижних штарковских синглетов основного $^3H_4$ мультиплета иона, что позволяет трактовать их в контексте основного «квазитриплета» некрамерсовского РЗ-иона, вносящего доминирующий вклад в магнитные свойства празеодим-содержащих гранатов.

В пятой главе «**Особенности магнитооптических спектров ионов Eu^{3+} и Tb^{3+}в гадолиний галлиевом ($Gd_3Ga_5O_{12}$) гранате»,** с помощью сравнения оптических и магнитооптических спектров была реализована симметрийная идентификация исследуемых волновых функций близкорасположенных штарковских подуровней возбужденных мультиплетов исследуемых ионов в структуре гадолиний-галлиевого (GGG) и европий-галлиевого гранатах.

На рис. 9 и 10 представлены спектры поглощения и МКД монокристалла $Eu_3Ga_5O_{12}$ (EuGG), записанные в спектральном диапазоне от 526 до 596 нм. В спектре поглощения были найдены три линии для полосы поглощения $^7F_1 \rightarrow {}^5D_0$ при энергиях 16818, 16897 и 16924 $см^{-1}$ (рис.9). Анализ спектров МКД, показал, что основной вклад в МКД ионов Eu^{3+} вносят «парамагнитные» C′ - члены. МКД особенности линий 1 и 2 могут быть связаны с двумя абсорбционными магнитооптически-активными переходами: Γ_3, $\Gamma_4 \rightarrow \Gamma_1$ и Γ_2, $\Gamma_3 \rightarrow \Gamma_1$. Эти переходы происходят из двух близкорасположенных штарковских синглетов низколежащего $^7F_1$ мультиплета («смешиваемых» внешним магнитным полем) на «изолированный» синглет возбужденного $^5D_0$ мультиплета основной $4f^{(6)}$-конфигурации Eu^{3+}. Спектр МКД, показанный на рис. 10, измерялся в образце EuGG вдоль направления [111] кристалла во внешнем магнитном поле H = 5,0кЭ при T = 300 К.

Доминирующей особенностью кривой МКД, отмеченной индексом -2 на рисунке 10, является переход типа синглет → «квазидублет», реализующийся из основного состояния $^7F_0(\Gamma_1)$ на «квазидублет» Γ_3, Γ_4 в мультиплет $^5D_1$.

Кривая МКД, имеющая форму линии поглощения (отмеченную индексом -

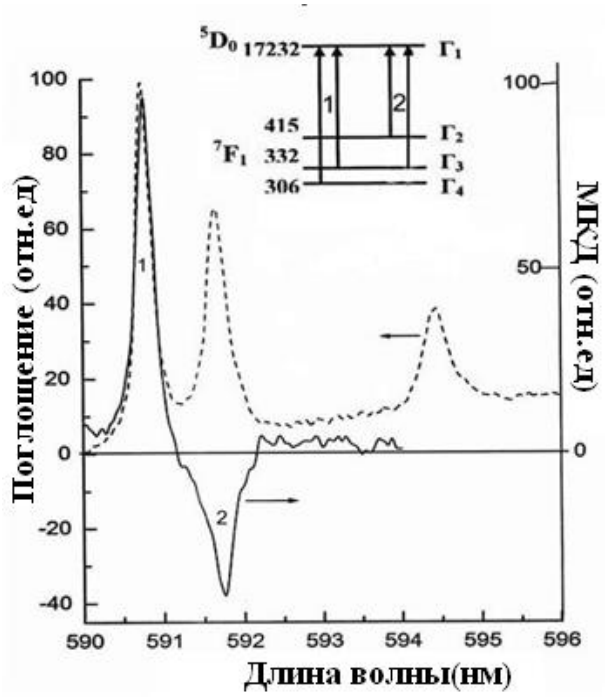


Рис.9. Спектры поглощения (пунктирная линия) и МКД во внешнем поле H = 5,0кЭ (сплошная линия), записанные без сглаживания при T = 300 K на полосе поглощения $^7F_1 \rightarrow {}^5D_0$ в EuGG.

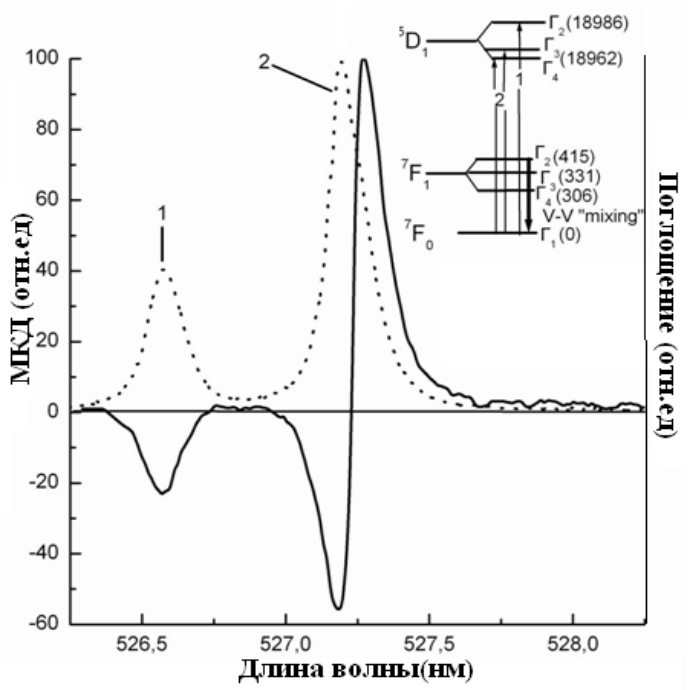


Рис.10. Спектры поглощения (пунктирная линия) и МКД во внешнем поле H = 5,0кЭ (сплошная линия), записанные без сглаживания при T = 300 K на полосе поглощения $^7F_0 \rightarrow {}^5D_1$ в EuGG.

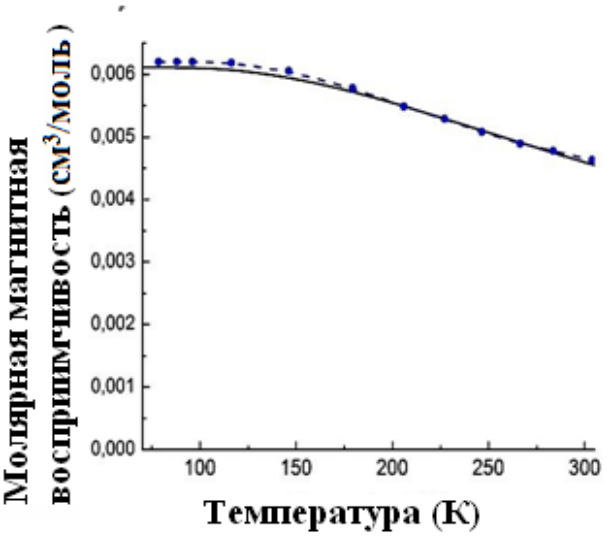


Рис. 11. Температурная зависимость молярной магнитной восприимчивости χ EuGaG вдоль оси [111] кубического кристалла: штрих пунктирная линия соответствует измеренным данным, сплошная линия иллюстрирует результаты расчета.

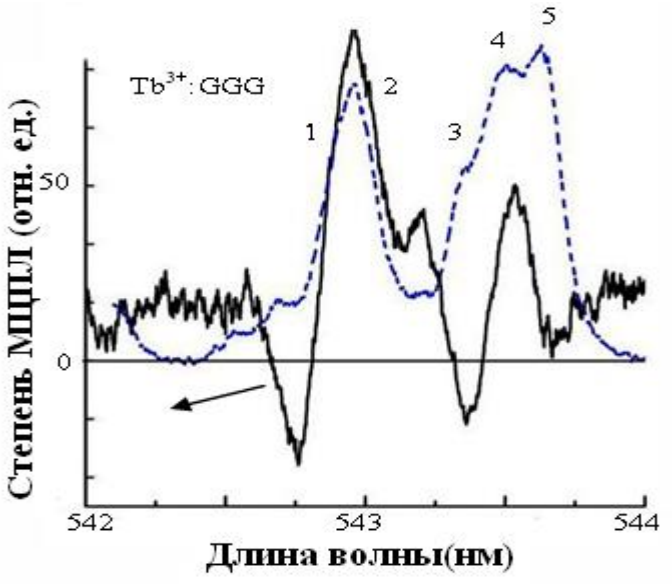


Рис.12. Спектр люминесценции (пунктирная линия) и МЦПЛ (сплошная линия) , записанные без сглаживания при T = 85K во внешнем поле H = 6,0 кЭ на полосе флуоресценции $^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ в Tb^{3+}: GGG и Tb^{3+}:YGG.

1 на рис. 10), обусловлена Ван-Флековским «смешиванием» штарковских подуровней мультиплетов $^7F_0$ и $^7F_1$ в присутствии внешнего магнитного поля.

Ещё одним подтверждением проявления Ван-Флековского «смешивания» в EuGaG явился теоретический расчет его молярной магнитной восприимчивости. Результаты расчета описывают с хорошей степенью точности экспериментальную температурную зависимость $\chi_m(Eu^{3+})$, как показано на рис.11. Полученные экспериментальные результаты находятся в удовлетворительном согласии с аналогичными данными, которые были найдены для кристалл-полевого расщепления уровней энергии РЗ-иона Eu^{3+} в гадолиний – галлиевом гранате $Gd_3Ga_5O_{12}$. В ходе анализа оптических и магнитооптических спектров редкоземельного иона $Tb^{3+}(4f^{(8)})$ в монокристаллах гранатов $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) и $Y_3Ga_5O_{12}$ была отмечена сложная структура спектральной зависимости степени МЦПЛ для $Gd_3Ga_5O_{12}$ (рис.12), которая, по-видимому, может быть обусловлена двумя магнитооптически-активными переходами между подуровнями мультиплетов $^5D_4$ и $^7F_5$ РЗ-иона $Tb^{3+}(4f^{(8)})$, возникающих одновременно.

В шестой главе **«Магнитооптика неупорядоченных парамагнитных редкоземельных соединений $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$:5%Pr^{3+}»** приведены результаты исследования магнитооптических спектров неупорядоченных парамагнитных соединений $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$:5%Pr^{3+}. Из полученных экспериментальных данных было найдено отношение параметров интенсивностей $F_\lambda(\lambda=2,4,6)$ магнитооптически-активных внутриконфигурационных 4f→4f переходов, подобных Джадовским параметрам Ω_λ на мультиплеты $^3P_2$ и $^3P_1$. На рис.13 приведены спектры МКД РЗ-соединений $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$:5%Pr^{3+}, измеренные при T=90 и T=300K во внешнем магнитном поле ориентированным вдоль тригональной оси C исследуемого кристалла.

Хорошо видно, что характер кривых МКД существенно различается для переходов: $^3H_4\rightarrow{}^3P_2$ и $^3H_4\rightarrow{}^3P_1$, соответственно. В области перехода $^3H_4\rightarrow{}^3P_1$ (длина волны 475нм) преобладает C-член МОА, в то время как, в области переходов: $^3H_4\rightarrow{}^3P_2$ (длина волны 450 нм) - преобладает A-член МОА. Кроме того, наблюдается возрастание величины МКД при понижении температуры (практически, для всех наблюдаемых переходов), что свидетельствует о существенном вкладе «парамагнитного» механизма МОА (C-член) в МКД разупорядоченных гранатов $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$:5%Pr^{3+}.

В соответствии с формулой из температурной зависимости нулевого момента:

$$\frac{1}{D}\left(\frac{C}{k_BT}+B\right)=2{,}14\frac{\langle\Delta A\rangle_0}{\langle A_0\rangle} \qquad (7)$$

где B – вклад «смешивания» в МКД, k_B - константа Больцмана, $\langle\Delta A\rangle_0$ и $\langle A_0\rangle$ - нулевые моменты полос МКД и оптического поглощения соответственно.

С другой стороны, отношение парамагнитных вкладов (C-членов МКД) для переходов на мультиплеты $^3P_2$ и $^3P_1$ может быть выражено посредством

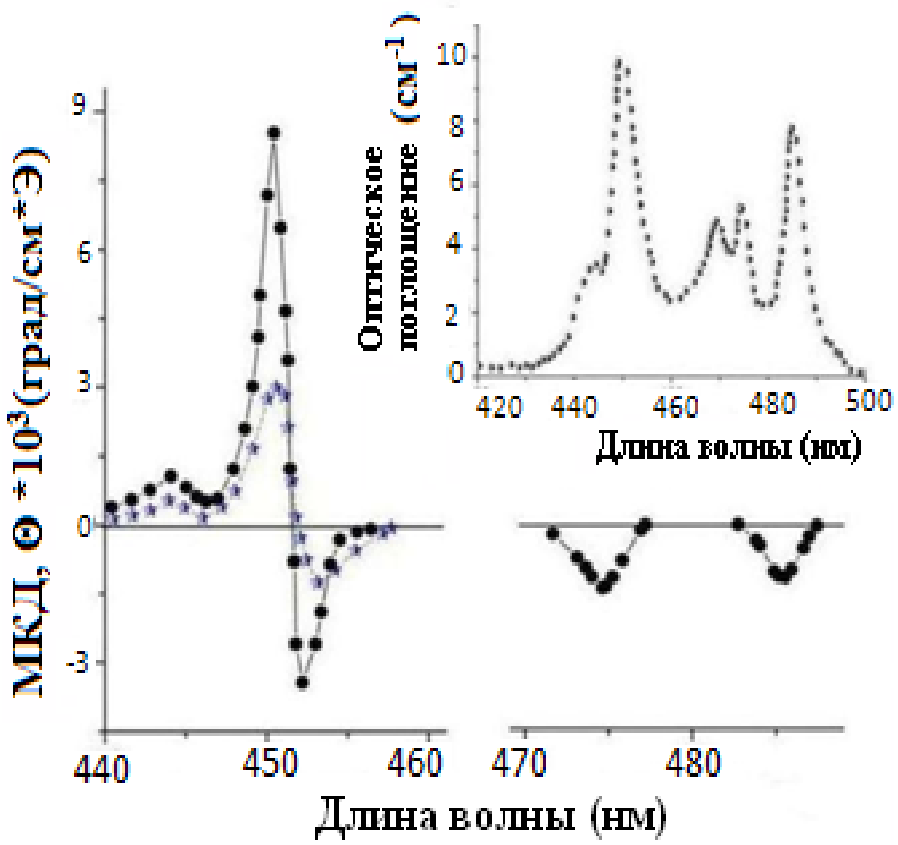


Рис.13. Спектры МКД РЗ-соединений $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$:5% Pr^{3+}, измеренные при T=90 K (-●-) и T=300K (-*-).

отношения Джадовских параметров F_4:F_6 для 4f-4f переходов в соответствии с формулой:

$$C(^3P_2)/C(^3P_1) = 3{,}8 + 2{,}6(F_6 / F_4) \qquad (8)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных выше исследований, выполненных в диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему: «Магнитооптика некрамерсовских ионов Eu^{3+}, Tb^{3+} и Pr^{3+} в парамагнитных кристаллах» были получены следующие результаты:

1. Впервые экспериментально найдена величина «гиромагнитного» вклада и значение «гиромагнитной» константы Верде $V_{gm}^{(m)}$ = +(0.0038 ± 0.0005) мин/см*Э в ЭФ монокристалла парамагнитного граната $Eu_3Ga_5O_{12}$ и было произведено сравнение полученного значения с результатами теоретического рассчета равного $V_{gm}^{(m)}$ = +0.0041 мин/см*Э.

2. В результате сопоставления спектров оптического поглощения и МКД $Eu_3Ga_5O_{12}$ выполнена симметрийная идентификация экспериментально найденных Штарковских подуровней $^5D_0$,$^5D_1$,$^7F_0$ и $^7F_1$ мультиплетов иона европия в структуре граната, которая находится в удовлетворительном

согласии с данными численных рассчетов кристалл-полевого расщепления уровней энергии РЗ-иона Eu^{3+} в КП симметрии D_2.

3. Сравнение особенностей спектров МЦПЛ гранатов Tb^{3+}: GGG и Tb^{3+}:YGG, наблюдаемых в интервале длин волн 542-544 нм при Т= 90К дало возможность обнаружения передачи энергии оптического возбуждения в УФ области спектра от одного иона Tb^{3+} к другому посредством возбужденных состояний иона гадолиния Gd^{3+}.

4. На основе сопоставления данных оптических и магнитооптических исследований парамагнитных редкоземельных соединений было установлено, что в механизме возникновения фарадеевского вращения и МКД на полосах поглощения, обусловленных «запрещенными» 4f- 4f переходами в некрамерсовских ионах Pr^{3+} и Eu^{3+}, имеющих «квазидублетную» структуру в энергетических спектрах, существенную роль играет эффект квантово-механического «смешивания» трех нижних Штарковских подуровней основного мультиплета $^3H_4$ (Pr^{3+}), а также подуровней мультиплетов $^7F_0$ и $^7F_1$(Eu^{3+}).

5. Экспериментально была измерена температурная зависимость молярной магнитной восприимчивости $\chi_m(Eu^{3+})$ вдоль оси [111] кубического монокристалла $Eu_3Ga_5O_{12}$ в широком интервале температур, которая с точностью от 1,5-2% согласуется с теоретически рассчитанной температурной зависимостью с использованием набора волновых функций для кристалл-полевых уровней иона Eu^{3+} в кристаллическом поле D_2 симметрии.

6. Впервые магнитодипольный характер перехода $^7F_0 \rightarrow {}^5D_1$ в РЗ-гранате EuGG подтвержден результатами исследований МКД при Т=90К и Т=300К, интерпретация которых базируется на учете смешиваний состояний штарковских мультиплетов $^7F_0$ и $^7F_1$ иона Eu^{3+} в структуре граната.

7. Впервые в результате сопоставления спектров МКД и полос оптического поглощения, обусловленных внутриконфигурационными 4f→4f переходами $^3H_4 \rightarrow {}^3P_1$ (~475нм) и $^3H_4 \rightarrow {}^3P_2$ (~450 нм) в неупорядоченных парамагнитных гранатах $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$:5%Pr^{3+} из полученных экспериментальных данных были найдены: отношение Джаддовских параметров интенсивностей Ω_λ для переходов $^3H_4 \rightarrow {}^3P_{1,2}$, равное $\Omega_6 : \Omega_4$=2,0; экспериментально определены величины их магнитооптической активности C/D, равные 0,8β и -0,7β, в то время как теоретические значения составили, соответственно-1,5β и 1,6β.

SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREES DSc. 30.05.2018. FM/T.65.01 AT THE INSTITUTE OF ION- PLAZMA AND LASERS TEHNOLOGIES

NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN

MALYSHEVA MARIYA EVGENIYEVNA

MAGNETOOPTICS OF THE NON-KRAMERS IONS Eu^{3+}, Tb^{3+} AND Pr^{3+} IN PARAMAGNETIC CRYSTALLS

01.04.05 – Optics

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

Tashkent – 2019

The theme of dissertation of the doctor of philosophy on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under №B2017.2.PhD/FM68.

The dissertation has been carried out at the National University of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian and English (resume) languages on the website of Scientific council atwww.inp.uz and on the website of «Ziyonet» Information and educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific supervisor:	**Valiev Uygun Vakhidovich** doctor of sciences in physics and mathematics, professor
Official opponents:	**Nematov Sherzod Qalandarovich** doctor of sciences in physics and mathematics
	Akhmedzhanov Farkhad Rashidovich doctor of sciences in physics and mathematics, associated professor
Leading organization:	**Samarkand State University**

The defense of dissertation will be held on the «___»_____2019 at ____ at the meeting of the Scientific council DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 at the Institute of Ion-Plasma and Laser Techologies (Adress: 33 Durmon yoli str. 100125, Tashkent, Uzbekistan, Phone: (99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.net, Meetinng Room of the Institute of Ion-Plasma and Laser Techologies).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through at the Information and Resource Center of the Institute of Ion-Plasma and Laser Techologies (registered under №_____). (Adress: 33 Durmon yoli str. 100125, Tashkent, Uzbekistan, Phone: (99871) 262-32-54)

The abstract of dissertation was distributed on «_____» _____ 2019.

(Registry record № _____on «_____»_____ 2019.)

Kh.B. Ashurov
Chairman of scientific council on award of scientific degrees, D.T.S., professor

D.T. Usmanov
Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, D.Ph.M.S., Senior Researcher

B.E. Umirzakov
Chairman of scientific seminar under scientific council on award of scientific degrees, D.Ph.M.S., professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research is to carry on the experimental and theoretical studies of magnetooptical, magnetic and optical features of crystals of yttrium-aluminum garnet doped with the non-Kramers Pr^{3+} ions and gadolinium-gallium garnet doped with the non-Kramers Eu^{3+} and Tb^{3+}ions and mechanisms of magnetooptical effects in them.

The tasks of the researchare:

theoretical calculations of the gyromagnetic Verde constant V from the Faraday effect (FE) in single crystal of paramagnetic garnet $Eu_3Ga_5O_{12}$(EuGG) and comparison of the results with those obtained experimentally;

comparison of the measured optical absorption and magnetic circular dichroism (MCD) spectra, as well as the luminescence and magnetic circularly polarized luminescence (MCPL) spectra of the non-Kramers Eu^{3+}, Tb^{3+}andPr^{3+} ions in single crystals of paramagnetic garnets within the near ultraviolet and visible spectral range for temperature 90 K and 300 K;

experimental study and theoretical calculation of magnetic susceptibility of paramagnetic garnet single crystal $Eu_3Ga_5O_{12}$(EuGG);

theoretical and experimental justification of the magnetic dipole nature of the $^7F_0 \rightarrow {}^5D_1$ transition with taking into account the «mixing» of the $^7F_0$ and $^7F_1$ multiplets under the action of an external magnetic field;

experimental study and analysis of the MCD spectra to obtain information on the parameters of intensities of magnetooptically active intraconfigurative4f→4f transitions $F_\lambda(\lambda=2,4,6)$ similar to the Judd parameters Ω_λ of magnetooptical activity of disordered paramagnetic crystal $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$: 5% Pr^{3+}.

The objects of the research: single crystals of paramagnetic garnets $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG), $Y_3Ga_5O_{12}$ (YGG), $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG), $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$ doped with non-Kramers ions $Eu^{3+}(4f^8)$, $Tb^{3+}(4f^8)$ and $Pr^{3+}(4f^2)$, as well as single crystal of $Eu_3Ga_5O_{12}$(EuGG).

The subject of the research is to establish the main mechanisms of the magnetooptical effects in paramagnetic garnets, determine a more exact structure of the energy spectra and carry on symmetry identification of the wave functions of the close Stark sublevels of the excited multiplets of the ground state of the $4f^{(n)}$ electronic configuration of the non-Kramers Eu^{3+}, Tb^{3+} and Pr^{3+} ions in single crystals of the paramagnetic garnets on the basis of the results of the magnetooptical, optical and magnetic studies.

The scientific novelty of the researchis as follows:

For the first time the values of the «gyromagnetic» contribution and gyromagnetic Verde constant have been experimentally obtained for the Faraday effect of single crystal of paramagnetic garnet $Eu_3Ga_5O_{12}$ and they have been compared with those calculated theoretically;

As a result of analysis of the magnetooptical studies of paramagnetic rare-earth compounds, it has been found that the effect of quantum-mechanical «mixing» plays a significant role in a mechanism of appearing the magnetooptical effects for the absorption bands due to the «forbidden» 4f→4f transitions in the non-Kramers Pr^{3+} and Eu^{3+} ions with the «quasi-doublet» structure in the energy spectra;

For the first time, with the use of a set of the wave functions for crystal-field levels of the Eu^{3+} ion in the crystalline field of the D_2symmetry, the temperature dependence of molar magnetic susceptibility $\chi_m(Eu^{3+})$ has been theoretically calculated along the axis of cubic single crystal $Eu_3Ga_5O_{12}$ within the wide range of temperature, which is in good agreement with the experimentally obtained temperature dependence;

For the first time the magnetic dipole nature of the $^7F_0 \rightarrow {}^5D_1$ transition in the RE garnet EuGG has been verified the results of the researchers of the MCD on T=90K and T=300K with taking into account the «mixing» of the $^7F_0$ and $^7F_1$ Stark multiplets of Eu^{3+} ion in the structure of the garnet;

As a result of studying the magnetooptical spectra of disordered paramagnetic compounds $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$: 5% Pr^{3+} the ratio of the Judd parameters of the intensities of the magnetooptically active inside-configuration 4f→4f transitions has been defined and a value of their magnetooptical activity has been calculated theoretically.

Implementation of the research results. On the basis of magnetooptical features of the rare-earth Eu^{3+}, $Tb^{3+}$and Pr^{3+}ions doped into the garnet crystals (gallates and aluminates):

the special features of magnetooptics of the Tb^{3+}ions in the structure of gadolinium-gallium garnet and the methodical developments of observations and measurements of the magnetooptical effects in crystals along with a method of modulated polarization have been used by the company «Technodesign-consulting» for production of magnetooptical materials in the part related to the magnetooptics of the Tb^{3+}ions in various crystal matrixes (Letter of Russian company «Technodesign-consulting» No. 10/04-19 of 15.05.2019).Using of results gave possibility of important increasing of magnetooptical activity growed crystals ittrium-aluminium granate, dopted by Eu^{3+}, Tb^{3+} ions.

the results of the absorption spectra of intraconfigurational transitions in europium-gallium garnet have been used by foreign researchers (references in International journals: Journal of Rare Earths, Vol 30, No.10, 2012, IF:2,524; Journal of Rare Earths, Vol 30, No.12, 2015, IF:2,524; Journal of Applied Physics,114,163521, 2013; IF:1,82; Journal of Luminescence, 2015, IF:1,40; Coordination Chemistry Reviews, 295, 2015, IF:4,87) to interpret an energy spectra and calculate the wave functions of the energy levels of the RE ions in crystalline structures. The obtained results have made it possible to define an energy structure of the $4f^6$-configuration of the Eu^{3+}ion, calculate the intensity of intraconfigurational transitions and demonstrate how the crystalline structure of europium-gallium garnet changes with pressure.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of Introduction, six Chapters, Conclusion and Reference. The dissertation volume is 129 pages.

ЭЪЛОНҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОКОПУБЛИКОВАННЫХРАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Valiev U.V., Gruber J.B., Fu D., Pelenovich V.O., Burdick G.W., and Malysheva M.E. Specific features of Eu^{3+} and Tb^{3+} magnetooptics in gadolinium - gallium garnet ($Gd_3Ga_5O_{12}$)// J. Rare Earths.-Антверпен, 2011. – Vol.29,№8, p.776-782.(№ 4.Journal Citation Reports; IF=2.524)

2. Valiev U.V., Gruber J.B., Burdick G. W., Pelenovich V. O., Malysheva M.E// Magnetooptics of magnetic-dipole transitions in rare-earth paramagnetic garnets //Optics and Spectroscopy.-Sankt-Peterburg, 2012. – т. 112, №6, с.928-934. (№11.Springer, IF=0.824)

3. Валиев У.В., Gruber J.B., Малышева М.Е, Жураева Н.И. Магнитный круговой дихроизм ионов Pr^{3+} в кристаллах иттрий – алюминиевого граната//Оптика и спектроскопия. – Санкт-Петербург, 2013. – том 114, №5.- С.777-784.(№11.Springer, IF=0.824)

4. Валиев У.В., Малышева М.Е.Вклад магнитодипольных переходов в эффект магнитной циркулярной анизотропии спектров поглощения европий-галлиевого граната($Eu_3Ga_5O_{12}$) // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2013. – Vol.15, № 5-6. – С. 265-269.(01.00.00. №5)

5. Валиев У.В., Малышева М.Е.Особенности магнитооптических свойств редкоземельного иона Eu^{3+} в европий – галлиевом гранате ($Eu_3Ga_5O_{12}$) //УзМУ Хабарлари. – Ташкент, 2013. – № 2/1. – С.48-50.(01.00.00.№8)

6. Agisheva T.,Valiev U.V., Malysheva M.E. Magnetooptics of magnetic-dipole transitions of Eu^{3+}ions in rare-earth paramagnetic garnets// УзМУ Хабарлари.-Ташкент, 2013. – № 2/1. – С.28-31. (01.00.00.№8)

7. Валиев У.В., Пеленович В.О., Малышева М.Е. Влияние эффекта «quantum cutting» на магнитооптические свойства редкоземельного иона Tb^{3+} в гадолиний – галлиевом гранате ($Gd_3Ga_5O_{12}$) //Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2013. – № 5. – С.15-19.(01.00.00.№7)

8. Валиев У.В., Малышева М.Е.Влияние штарковской структуры ионов Pr^{3+} в кристаллах иттрий – алюминиевого граната на магнитную циркулярную анизотропию спектров поглощения// Узбекский физический журнал.-Ташкент, 2014. – Vol.16, № 4. – С. 285-291. (01.00.00. №5)

9. Малышева М.Е, Валиев У.В. Магнитооптика неупорядоченных парамагнитных редкоземельных соединений $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$: 5%Pr^{3+}// Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2019. – Vol.21, № 1. – С. 34-39. (01.00.00. №5)

II бўлим (II часть; part II)

10. Valiev U.V., Gruber J.B., Pelenovich V.O., Malysheva M.E. Faraday effect on the magnetic-dipole transitions in rare-earth paramagnetic garnets //2011 International Workshop Beam Applications of Functional Materials, august 19-22. – Jinan, 2011. – P.19-20.

11. Валиев У.В., Малышева М.Е. Гиромагнитный эффект Фарадея редкоземельных ионов Eu^{3+} в кристаллах//Фан ва таълим ва ишлаб чикариш интеграциясини ахборот коммуникация технологиялари асосида ривожлантириш муаммолари: Материалы Республиканской научно-практической конф., КДУ. – Карши, 2012 – С.436-439.

12. Валиев У.В., Малышева М.Е. Спектры поглощения и магнитного кругового дихроизма в европий-галлиевом гранате// Фан ва таълим ва ишлаб чикариш интеграциясини ахборот коммуникация технологиялари асосида ривожлантириш муаммолари: Материалы Республиканской научно-практической конф. , КДУ. – Карши, 2012. – С.193-197.

13. Валиев У.В., Малышева М.Е. Магнитооптика внутриконфигурационных переходов иона в структуре иттрий-алюминиевого граната. //Актуальные проблемы физической электроники: Межд. Конф., Институт ионно-плазменных и лазер. техн., 28 ноября 2012. – Ташкент, 2012. – С. 112-113.

14. Валиев У.В., Малышева М.Е., Саидова Г. Магнитооптические и оптические свойства редкоземельных ионов в кристаллах иттрий – алюминиевого граната $Y_3Al_5O_{12}$//Физика фанининг ривожида истеъдодли ёшларнинг урни: Респ. Конф., НУУз., 26-27 апрель 2013. – Ташкент, 2013. – С.106-109.

15. Валиев У.В., Пеленович В.О., Малышева М.Е. Влияние эффекта «quantum cutting» на магнитооптические свойства редкоземельного иона Tb^{3+} в гадолиний – галлиевом гранате ($G_3G_5O_{12}$). //Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред: IV Межд. конф. 29-31 мая 2013, – Самарканд, 2013. – с.102-103.

16. Malysheva M.E., Valiev U.V., Pelenovich V.O., Fu D. Magnetooptics of Pr^{3+} ion in the trigonal Ca-gallogermanate $Ca_3Ga_2Ge_4O_{14}$.// Proccedings of Information Technology and Industrial Automation (ICITIA2018): 3rd International Conference, December 21-22. – Guangzhou, 2018. – P.548-552.

Автореферат «Тил ва адабиёт таълими» журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди (05.08.2019 йил).

Босишга рухсат этилди: _____2019 йил.
Бичими 60x84 $^{1}/_{16}$, «Times New Roman»
гарнитурада рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 3,1. Адади: 100. Буюртма: № _____.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.