

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT
UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJA BERUVCHI
PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**MIRZO ULUG‘BEK NOMIDAGI O‘ZBEKISTON
MILLIY UNIVERSITETI**

RAXIMOV SHAROF AMONOVICH

**PARAMAGNIT GRANAT VA ORTOALYUMINAT KRISTALLARDA
NOKRAMERS NODIR YER IONLARINING MAGNITOPTIK VA
OPTIK SPEKTROSKOPIYASI**

01.04.09 – Magnit hodisalari fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI DOKTORI (DSc) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Samarqand – 2024

**Fizika-matematika fanlari doktori (DSc) dissertatsiyasi
avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора (DSc) физико-
математических наук**

**Content of the dissertation abstract of the doctor (DSc)
on physical and mathematical sciences**

Raximov Sharof Amonovich

Paramagnit granat va ortoalyuminat kristallarda nokramers nodir yer ionlarining magnitoptik va optik spektroskopiyasi..... 3

Рахимов Шароф Амонович

Магнитооптическая и оптическая спектроскопия редкоземельных некрамерсовских ионов в кристаллах парамагнитных гранатов и ортоалюминатов 29

Rakhimov Sharof Amonovich

Magneto-optical and optical spectroscopy of rare-earth non-cramers ions in crystals of paramagnetic garnets and orthoaluminates 55

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Spisok opublikovannyykh rabot

List of published works 59

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT
UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJA BERUVCHI
PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**MIRZO ULUG‘BEK NOMIDAGI O‘ZBEKISTON
MILLIY UNIVERSITETI**

RAXIMOV SHAROF AMONOVICH

**PARAMAGNIT GRANAT VA ORTOALYUMINAT KRISTALLARDA
NOKRAMERS NODIR YER IONLARINING MAGNITOPTIK VA
OPTIK SPEKTROSKOPIYASI**

01.04.09 – Magnit hodisalari fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI DOKTORI (DSc) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Samarqand – 2024

Fizika-matematika fanlari doktori (DSc) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiya vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B.2024.1.DSc/FM174 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston milliy universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.samdu.uz) va «Ziyonet» axborot ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy maslahatchi:

Valiyev Uygun Vaxidovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Muqimov Kamil Muqimovich
O'zRFA akademigi, fizika-matematika fanlari doktori, professor

Sharipov Mirzo Zokirovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Eshchanov Baxodir Xudayberganovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti

Dissertatsiya himoyasi Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti huzuridagi PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 raqamli Ilmiy kengashning 2024 yil «18» 05 soat 12⁰⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 140104, Samarqand shahri, Universitet xiyoboni, 15 uy. Tel.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; faks: (99866) 239-11-40; e-mail: rektor@samdu.uz Samarqand davlat universiteti Muhandislik fizikasi instituti, 1-qavat, 114--xona).

Dissertatsiya bilan Samarqand davlat universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (28 raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 140104, Samarqand shahri, Universitet xiyoboni, 15 uy. Tel.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; faks: (99866) 239-11-40).

Dissertatsiya avtoreferati 2024 yil «02» 05 kuni tarqatildi.
(2024 yil «01» 05 dagi TSUIM raqamli reestr bayonnomasi).



M.X. Ashurov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash raisi, f.-m.f.d., akademik

R.M. Rajabov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash ilmiy kotibi, f.-m.f.n., dotsent

O. Kuvandikov
Ilmiy kengash xuzuridagi ilmiy darajalar beruvchi ilmiy seminar raisi, f.-m.f.d., professor

KIRISH (fan doktori (DSc) dissertatsiyasiga avtoreferat)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Fizikaning ikki fundamental sohalari - fizikaviy optika va magnit hodisalar fizikasi chegarasida yuzaga kelgan nodir yer (NY) birikmalarining zamonaviy magnitoptik spektroskopiyasi turli nodir yer materiallarining (kristallar, shishalar va h.k.) H tashqi magnit maydon ta'sirida namoyon bo'ladigan optik xususiyatlari anizotropiyasi bo'yicha olib borilayotgan nazariy va eksperimental tadqiqotlar keng spektrini o'z ichiga oladi.

Hozirgi vaqtda dunyoda kristallarda nokramers NY-ionlarining (to'ldirilmagan qobiqda juft elektronlar soniga ega bo'lgan) elektron holatlari simmetriyasi va energetik spektrlarini batafsil o'rganishda magnitoptik metodlarni qo'llash muhim ahamiyat kasb etadi.

Bu holat, NY-birikmalar optik spektroskopiyasining ("hot-band" spektroskopiyasi, optik uyg'otishli polarizatsion spektroskopiya - OUPS) zamonaviy usullarini qo'llash jarayonida (ya'ni, nokramers ionlari) to'ldirilmagan qobiqdagi juft $4f$ -elektronlar soniga ega bo'lgan NY-ionlari optik spektrlarini tahlil qilishda ma'lum qiyinchiliklarga duch kelinishi bilan bog'liq, chunki tajribalarda kuzatiladigan ularning spektrlaridagi tashkil etuvchilar soni va intensivlik taqsimotlari nazariy hisoblashlar bilan mos kelmaydi. Tajriba va nazariyaning mos kelmasligiga sabab, optik tajribalarda energetik spektrlardagi bevosita ajratib olib tahlil qilish mumkin bo'lmagan «kvazidublet» deb ataluvchi strukturalarning paydo bo'lishi bilan bog'liq bo'lishi mumkin.

Granatlardagi nokramers ionlari (Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+} va boshqalar) optik spektrlarining tahlilidagi qiyinchiliklar ma'lum ma'noda bartaraf qilinishi mumkin, agarda ta'qiqlangan (elektrodipol yaqinlashishida) $4f \rightarrow 4f$ o'tishlardagi magnit doiraviy dixroizm (MDD), lyuminessensiyaning magnit sirkulyar qutblanishi (LMSQ) va boshqa magnitoptik effektlar chiziqli differensial magnitoptik spektroskopiya usullari yordamida o'rganiladigan bo'lsa.

Birinchi MDD va LMSQ lar paydo bo'lishining asosiy manbai optik o'tishlarda NY-ionlari energetik spektrlarida «kvazidublet» holatlarini aniqlash imkonini beruvchi, kombinatsiyalanuvchi nokramers ionlarining asosiy va uyg'otilgan multipletlari shtark sathostilarining aynimagan (ya'ni, kvaziaynigan) bir-biriga yaqin joylashgan to'lqin funksiyalarining H tashqi magnit maydoni bilan kvantomexanik "aralashishi" hisoblanadi. Ikkinchidan, optik o'tishlarning matrik elementlari uchun simmetriya (simmetriyali D_2 guruh) bo'yicha tanlash qoidasining qo'llanilishi optik o'tishlarda (ularda yoki ulardan) sodir bo'ladigan shtark sathostilari (kvazidubletlarni ham hisoblaganda) to'lqin funksiyalari simmetriyalarini aniqlashning noyob imkoniyatlarini ochib beradi. Shu sababli optik, magnit va magnitoptik tadqiqot usullaridan kompleks foydalanish ortoalyuminat va granat kristallaridagi nokramers NY-ionlari elektron holatlarining uyg'otilishi to'g'risida boshqa fizik tadqiqot usullari bera olmaydigan eksperimental axborotlarni olish imkonini beradi.

Respublikamizda fundamental fanlarni yanada rivojlantirishda ilmiy-tadqiqot faoliyatni rag'batlantirish, ilmiy va innovatsion yutuqlarni amaliyotga joriy

etishning samarali mexanizmlarini ishlab chiqish, shuningdek oliy o'quv yurtlari, ilmiy-tadqiqot institutlarida ixtisoslashtirilgan laboratoriyalar va yuqori texnologiyali markazlar yaratish yo'lida asosiy maqsad va vazifalar belgilab olingan. Ushbu maqsadlarni samarali amalga oshirish uchun davlatimiz tomonidan tadqiqotlarning ilmiy-eksperimental metodlariga katta e'tibor qaratilmoqda. NY-birikmalarning optik, magnit va magnitooptik xususiyatlarini tadqiq qilish metodlari shular jumlasidandir. Shuningdek olingan ilmiy yangiliklarni zamonaviy texnika va texnologiyalarga tadqiq qilish muhim hisoblanadi. Ushbu turdagi tadqiqotlar nafaqat mamlakatimiz olimlari, balki dunyo mamlakatlarining turli ilmiy markazlari tadqiqotchilarini ham qiziqtirib kelmoqda.

Ushbu dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 8-oktabrdagi "O'zbekiston Respublikasi oliy ta'lim tizimini 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida"gi PF-5847-sonli Farmoni, 2020 yil 29 dekabrda Oliy Majlisga Murojaatnomasi¹, 2021 yil 19 martdagi PQ-5032-sonli "Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi, 2022-yil 13-yanvardagi PQ-82-son "Samarqand davlat universiteti faoliyatini yanada takomillashtirishga doir qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi Qarorlari hamda ushbu faoliyatga oid boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining asosiy ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot O'zbekiston respublikasi fan va texnikani rivojlantirishning: II "Energiya, energiya va resurslarni tejash, transport, mashina va asbobsozlik; zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika, elektron asboblarni ishlab chiqish" va PFI-2 «Fizika, astronomiya, energetika va mashinasozlik» ustuvor yo'nalishlariga muvofiq amalga oshirildi.

Dissertatsiya mavzusi bo'yicha xorijiy ilmiy-tadqiqotlar sharhi²: XXI asrning dastlabki ikki o'n yilligida: Department of Physics, San Jose State University, San Jose (USA), The of School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan (China), The Katholieke Universiteit, Leuven (Belgium), Moskva davlat universitetida (MGU), A.V. Shubnikova nomidagi kristallografiya institutida (RAN), A.N.Proxorov nomidagi umumiy fizika institutida (Rossiya), L.V.Kirenskiy nomidagi fizika (Krasnoyarsk) institutida , Xarkov past haroratlar instituti (FTINT, Ukraina) kabi dunyoda tan olingan yetakchi ilmiy tekshirish markazlarida va O'zbekiston Milliy universitetida (O'zMU) NE-magnetiklarning optik, magnit va magnitooptik xossalari tadqiq qilish borasida nazariy va eksperimental tekshirish ishlari jadal ravishda olib borilmoqda.

Dissertatsiya ishida ilmiy yo'nalish bo'yicha jahon miqyosida qator dolzarb muammolar hal qilingan va NY-birikmalarining magnitooptika va optika sohasidagi muhim ilmiy natijalar olingan, xususan kristall maydonlar (KM)

¹ Mirziyoyev Sh.M. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Oliy Majlisga Murojaatnomasi // Xalq so'zi, 2020 yil, 30 dekabr, №275-276(7746-7747), 1-bet

² Диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий текшириш ишларининг таҳлили қуйидагилар бўйича олиб борилди: <https://journals.aps.org>, <https://ufn.ru>, <https://www.elsevier.com> <https://apps.webofknowledge.com>, iopscience.iop.org, journals.ioffe.ru, WebofScience, Scopus, Springer. Research.

nazariyasi metodlaridan foydalanib D_2 va C_5 quyi simmetriyalı kristall maydonlarda uch valentli Tb^{3+} , Ho^{3+} , Tm^{3+} , Eu^{3+} va boshqa NY-ionlarining to‘lqin funksiyalari va energetik spektrlari hisoblangan, (San Jose State University, Katholieke Universiteit) hamda past haroratlarda NY-granatlari tarkibida Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} va Tm^{3+} kabi NY-ionlari qo‘shilgan ortoalyuminatlarning yutilish spektrlari va lyuminessensiyalari yetarlicha keng harorat hamda to‘lqin uzunligi diapazonlarida tadqiq qilingan (O‘zMU, MGU, FTINT va boshqalarda), shuningdek 4,2 K gacha bo‘lgan o‘ta past haroratlarda turlicha granatlar kristallaridagi kramers (Dy^{3+} , Er^{3+}) va nokramers (Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+}) nodir yer ionlari spektrlarining Zeeman ajralishlari tadqiq qilingan (O‘zMU FTINT, RAN fizika instituti bilan hamkorlikda) va NY-paramagnit shishalarda (RAN fizika instituti), NY-granatlari va ortoalyuminatlar kristallarida (O‘zMU, FTINT) temperatura va to‘lqin uzunliklarining keng intervalida magnit doiraviy dixroizm (MDD) va Faradey effektlari (FE) ni o‘lchash ishlari amalga oshirilgan.

Birinchi marotaba NY-ionlari Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Dy^{3+} va Er^{3+} bilan faollashtirilgan itriy-aluminiyli granatning ko‘rish diapazonida keng temperatura intervalida magnit doiraviy qutblaninish lyuminessensiyasi (MDQL) batafsil tadqiq qilindi (O‘zMU, Wuhan University).

Hozirgi vaqtda dunyoning ko‘plab mamlakatlarida istiqbolli yo‘nalishlarda, xususan spin-elektronika, magnitoelektronika va zamonaviy materialshunoslikda fotonika uchun optik zatvor, deflektorlar, magnitoptik modulyatorlar yaratishda qo‘llaniladigan NY-paramagnit birikmalar magnitoptik xossalarini ilmiy tekshirish bo‘yicha ilmiy izlanish ishlari jadal suratda olib borilmoqda.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Hozirgi vaqtda magnitlanishlari ularning optik xususiyatlarini rekord darajasida o‘zgarishlari (50÷100% gacha) ga olib keladigan NY-birikmali kristallar bo‘yicha eksperimental izlanish va nazariy tadqiqotlar jarayoni, istiqbolli ilmiy yo‘nalishlardan hisoblanadi.

Tashqi magnit maydoni ta’sirida kristallardagi NY-ionlari panjaraosti natijaviy magnit momentlarining (yoki o‘tish ionlari uchun spin tizimi) burilishi orqali, yutilish yoki lyuminessensiya spektrlaridagi chiziqlarda chiziqli yoki doiraviy qutblangan tashkil etuvchilarning paydo bo‘lishi, yo‘qolishi va siljishi hodisalarini bevosita boshqarish imkonini beruvchi bu turdagi optiko-magnit hodisalarni magnit maydoni orqali boshqariladigan magnitofaol ionlar optikasi deb atash mumkin (sof Faradey, Kerr va Koton-Mutton magnitoptik effektlardan farqli o‘laroq).

Nodir yer ferrit-granatlari (NEFG) monokristallarida NY-ionlar optikasini magnit maydon bilan boshqarish bo‘yicha o‘tkazilgan dastlabki tajribalar (nisbatan kuchsiz tashqi magnit maydonlari orqali granat magnitlanishini burishda) ba’zi ferrit-granatlarda infraqizil yutilish spektrlarini keskin o‘zgartirish imkoniyatlari mavjudligini ko‘rsatib berdi.

Magnit tartiblangan kristalda NY-ioniga ta’sir qiluvchi va alohida olingan NY-ioni bilan tashqi magnit maydon o‘zaro ta’siridan $3\div 4\text{ sm}^{-1}$ tartibda yuqori bo‘lgan effektiv magnit maydoni (yoki almashinish maydoni) Zeeman effektini yuzaga keltiradi, lekin bu holda yutilish chiziqlarining Zeeman komponentalari orasidagi intervallar $2\div 3\text{ sm}^{-1}$ tartibga kattalashgan bo‘ladi.

Nodir yer ferrit-granatlari (NEFG) va nodir yer ortoferritlari (NEF) kristallaridagi NY-ionlar optik xossalarini boshqarishning bunday fizik mexanizmlari optiko-magnit va magnitooptik effektlarning paydo bo'lishiga olib keladi. Bu asosan 1,5÷5mkm to'liq uzunligi diapazonidagi infraqizil (IQ) nurlardan amaliyotda qo'llashda katta qiziqish uyg'otadi.

Ushbu holat ulardan amalda qo'llash doirasini sezilarli darajada kamaytiradi va magnit orqali boshqariladigan optik qurilmalarni (modulyatorlar, lazer nurlanishi uchun optik ventillar va boshqa magnito-optik qurilmalar) yaratish imkoniyatlarini chegaralaydi.

Shu sababli, keyinchalik ananaviy qarab chiqiladigan paramagnit kristallarda NY-ionlari kvant holatlarining zeeman ajralishlarining magnitooptik mexanizmlaridan prinsipial farq qiluvchi NY-ionlari optik xususiyatlarini boshqarishning boshqa fizik mexanizmlari qarab chiqildi va o'rganila boshlandi.

Masalan, o'tgan asrning 80-yillarida tashqi magnit maydon bilan NY-ionlarining asosiy va ularga yaqin turgan energetik sathlar to'liq funksiyalarining yutilish (yoki nurlanish) chiziqlarida zeeman tashkil etuvchilari intensivliklarida sezilarli farqlar uyg'otilgan holat to'liq funksiyalari "aralashish"ini hisobiga namoyon bo'lishi inobatga olib kelingan.

Shu sababli, so'nggi yillarda katta qiziqish uyg'otayotgan nodir yer ionlari oksidli birikmalarining optik tadqiqotlari birinchi navbatda ularning amaliy qo'llanilishi imkoniyatlari istiqbollari bilan bog'liq.

Masalan, nodir yer 4f-ionlari oksidlari asosidagi birikmalar ko'rinadigan va ultrabinafsha diapazonlarda ishlaydigan lazerlarda faol muhit sifatida (up-conversion hamda an'anaviy optik damlash (nakachka) sxemalarida ishlaydigan), yuqori samaradorlikka ega lazer matritsalar, maydon emission displeylarning lyuminessent ekranlari, optik aloqa sistemalarida lazer nurlanishi optik ventillari va modulyatorlari uchun istiqbolli materiallar hisoblanadi.

Shu sababli, mazkur ishda NY-ionlarining bunday holatlari tashqi H magnit maydoni bilan "aralashib" ketadigan shtark sathostilarining optik va magnitooptik (magnit xossalari ham) tadqiqotlari NY-granatlari va ortoalyuminatlar kristallaridagi yutilish va lyuminessensiya spektrlaridagi chiziqlar tor chiziqli yoki doiraviy qutblangan tashkil etuvchilarining paydo bo'lishi, yo'qolishi va siljishi bilan namoyon bo'ladigan magnitooptik effektlarning sezilarli kattalikda namoyon bo'lishiga olib keladi. Asosiy e'tibor H magnit maydoni bilan o'zaro ta'siri (optik damlash sharoitida) magnitofaol ionlarning uyg'otilgan magnit sathostilarining to'ldirilish xarakteriga ega bo'lgan qo'shimchalarga olib keladigan Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+} NY-ionlariga qaratildi. Fizik nuqtai nazardan optik damlash bo'lmagan holda to'ldirilishi tashqi H magnit maydonida ham sof termodinamik muvozanat xarakteriga ega bo'lgan NY-ionlarining qo'zg'atilgan holatlari to'ldirilishining anomal ravishda qayta taqsimlanishida namoyon bo'lishi mumkin. Bir-biriga yaqin (energiya bo'yicha) joylashgan aynigan (yoki "kvaziaynigan") shtark quyi sathlarining bunday tanlangan to'ldirilishida H tashqi magnit maydonda samarali "aralashish"ni (Van-Flek mexanizmi) ta'minlaydigan to'liq funksiyalari simmetriyasi muhim rol o'ynaydi.

Aksariyat hollarda bu holat, mikroto'liqlik diapazon generatorlari va kvant kuchaytirgichlarini yaratishda ahamiyat kasb etuvchi va metastabil xarakterga ega bo'lgan NY-ionlarining uyg'otilgan $4f^{(n)}$ konfiguratsiyali asosiy energetik sathlarining invers to'dirilishlari paydo bo'lishiga olib keladi.

Yuqoridagilardan kelib chiqqan holda, ushbu dissertatsiya ishida optik, magnit va magnitooptik o'lchash metodlaridan foydalangan holda, granat va ortoalyuminat kristallografik strukturali NY-birikmalarida nokramers NY-ionlari elektron holatlarining shtark va zeeman ajralishi xususiyatlarini batafsil eksperimental o'rganish vazifasi qo'yildi.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejaları bilan bog'liqligi. Mazkur dissertatsiya ishi Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universitetida Davlat budjeti mavzulari doirasida Fizika fakulteti "Optika va lazer fizikasi" kafedrasida hamda O'zbekiston respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Fan va texnologiyalarni rivojlantirishni muvofiqlashtirish qo'mitasining OT-F2-064 raqamli grant loyihasi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi ortoalyuminat va granatlar (alyuminat va gallaslar) ning paramagnit birikmalardagi NY-ionlari kristall qamrab olishlari uchun xarakterli bo'lgan D_2 va C_5 quyi simmetriyali kristall maydonlarida (KM) shakllanuvchi, ularning energetik spektrlaridagi ajralish shtark ajralishining notrivial xususiyatlari bilan aniqlanuvchi granat va ortoalyuminat kristallaridagi Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+} nokramers NY-ionlarining magnit, optik va magnitooptik xususiyatlarining o'ziga xos tomonlarini o'rganishga asoslangan eksperimental va nazariy tadqiqotlar o'tkazish hisoblanadi.

Tadqiqotning vazifalari:

Djadd-Ofeltning $4f \rightarrow 4f$ o'tishlar intensivligi nazariyasi va nazariy-guruhiy metodlarni qo'llash asosida nokramer Ho^{3+} va Tm^{3+} NY-ionlari bilan to'ldirilgan granat strukturali kristallarda tajribada kuzatiladigan Ho^{3+} va Tm^{3+} kristallarda nokramers NY-ionlarining $4f \rightarrow 4f$ optik o'tishlarni identifikatsiya qilish;

Golmiy-ittriyl granat-gallatda ($HoYGG$) va tuliy-ittriyl granat-alyuminatda ($TmYAG$) $4f^{(n)}$ asosiy shtark sathosti multipletlari energiyalarini aniqlash va bu birikmalardagi past haroratlarda kuzatiladigan magnitooptik (LMSQ, MDD) va optik (yutilish, lyuminessensiya) effektlarning spektral bog'liqliklarini tahlil qilish asosida ular orasida sodir bo'ladigan optik o'tishlar identifikatsiyalarini amalga oshirish;

Past haroratlarda granat strukturasidagi nokramers Tb^{3+} ionlarining magnitooptikasiga "aralashish" effektining qo'shadigan hissasini o'rganish maqsadida terbiy-ittriyl $Tb_{0,2}Y_{2,8}Al_5O_{12}$ granat-alyuminatlarining $4f \rightarrow 4f$ nurlanishli ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ o'tishlarida past haroratlarda ham bo'ylama, ham ko'ndalang geometriyada Zeeman ajralishlari spektrlarini tadqiq qilish;

Terbiyli gallas-granatlarning optik va magnitooptik spektral bog'liqliklarining tahlili asosida gallas-granat strukturalardagi Tb^{3+} NY-ionlarining $4f^{(n)}$ asosiy shtark sathosti multipletlarining va aralash qo'zg'atilgan $4f^{(n-1)} 5d$ konfiguratsiyalarining identifikatsiyasini, hamda ular orasida sodir bo'layotgan optik o'tishlarni tadqiq qilish;

[110] ortorombik kristall tekisligiga orientirlangan $TbAlO_3$ NY-ortoalyuminatining yutilish spektrini $8\div 300K$ harorat intervalida $480\div 2940$ nm to'liq diapazonida yutilish spektrlarini o'rganish va $85\div 300K$ harorat intervalida $TbAlO_3$ dagi Tb^{3+} ionlarining nurlanuvchi $4f\rightarrow 4f$ o'tishlardagi $^5D_4\rightarrow ^7F_J$ ($J = 0, 1, \dots, 6$) lyuminessensiya spektrlarini tadqiq qilish;

$80\div 300K$ harorat intervalida ortorombik kristallning [110] va [001] kristallografik o'qlari bo'ylab $TbAlO_3$ ortoalyuminati χ magnit singdiruvchanligining haroratga bog'liqligini va $85\div 300K$ harorat intervalida hamda $420\div 750$ nm to'liq uzunliklarida rombik kristallning [110] kristallografik yo'nalishi bo'yicha $TbAlO_3$ ortoalyuminati strukturasi dagi Tb^{3+} ionlarining Faradey aylanishlarini haroratga bog'liqligini tadqiq qilish;

Quyi simmetriyali kristall maydonida nokramers Ho^{3+} va Tb^{3+} NY-ionlari optik spektrlarining o'ziga xos xususiyatlarini tadqiq qilish, shuningdek kristall maydon parametrlarini hisoblash sxemalarini tajriba asosida tasdiqlash.

Tadqiqot ob'ekti sifatida $TbAlO_3$ terbiy ortoalyuminati, terbiy-ittriyl $Tb_{0,2}Y_{2,8}Al_5O_{12}$ (TbYAG) granat-alyuminati, $Tm_xY_{3-x}Al_5O_{12}$ tuliy-ittriyl $Tm_xY_{3-x}Al_5O_{12}$ granat-alyuminati, golmiy-ittriyl $Ho_{0,2}Y_{2,8}Ga_5O_{12}$ (HoYGG) granat-gallati, shuningdek $Tb_3Ga_5O_{12}$ (TbGG) terbiy va godolin $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) granat-gallatlarning monokristallari olindi.

Tadqiqot predmeti yuqorida ko'rsatib o'tilgan NY-birikmalarining optik, magnit va magnitoptik xususiyatlarini harorat, to'liq uzunliklari va magnit maydonlarining keng diapazonlarida tadqiq qilish hisoblanadi.

Tadqiqot usullari. NY-kristall granatlari va ortoalyuminatlarining magnitoptik xususiyatlarini tadqiq qilish uchun differensial magnitoptik usullar, LMSQ, MDD va Faradey effekti (FE), shuningdek an'anaviy Zeeman spektroskopiyasidan foydalanildi. Ularning optik xususiyatlarini o'rganish optik yutilish, fluoressensiya va lyuminessensiyani uyg'otish spektrlarini (LUS) tadqiq qilish orqali amalga oshirildi. Yuqorida ko'rsatib o'tilgan NY-birikmalarining magnit xususiyatlari tebranuvchi namunaga ega ("vibromagnitometr" deb ataluvchi) magnetometrda tadqiq qilindi. Ortorombik (D_2) va monoklin (C_2) simmetriyali kristall maydonlarda nokramers NY-ionlari Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+} larning to'liq funksiyalari va energetik spektrlarini hisoblashlar kristall maydon (KM) nazariyasining zamonaviy hisoblash usullaridan foydalangan holda amalga oshirildi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

birinchi marotaba Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+} nokramers NY-ionlari bilan faollashtirilgan granat va ortoalyuminat kristallarida kuzatiladigan magnitoptik effektlarning spektral va haroratga bog'liqliklarida magnitofaol ionlarning elektron holatlari to'liq funksiyalarida kvantomexanik «aralashish»ni hal qiluvchi rol o'ynashi ko'rsatib berildi. Bu tasdiq quyida sanab o'tilgan dissertatsiya ishidagi original eksperimental natijalariga asoslangan:

olib borilgan simmetriya tahlili va "aralashish" effektini hisobga olish, terbiy-galliyli $TbGaG$ granatdagi Tb^{3+} ioni 7F_6 va 5D_4 shtark sathosti multipletlari orasidagi $4f\rightarrow 4f$ optik o'tishlari bilan terbiy-galliyli granatda $^7F_6\rightarrow ^5D_4$ yutilish polosasida chiziqlarning zeeman ajralilishidagi anomal holatni bog'lab ko'rib

chiqish imkonini berdi. Bu $4f \rightarrow 4f$ optik o'tishlar uchun ajralishning maydon bog'liqligi terbiyli granat-gallatda ham, terbiyli TbAG granat-alyuminatda ham bo'ylama magnit maydonida bo'lgani kabi xuddi shu multipletlarning shtark sathostilari orasidagi yaxshi ma'lum bo'lgan ko'pgina yutilish chiziqlaridagi zeeman ajralishi maydon bog'lanishlaridan farq qiladi;

bir tomondan LMSQ va MDD larning spektrlarini, ikkinchi tomondan yutilish va lyuminessensiya spektrlarini solishtirish orqali TbGG da 7F_6 , 7F_5 va 5D_4 multipletlarining shtark sathosti energiyalari va to'lqin funksiyalarining topilgan simmetriyalari terbiyli gallat-granatdagi Tb^{3+} nodir yer ioni energetik spektrining sonli hisoblash natijalari bilan o'z tasdig'ini topdi;

birinchi marotaba tuliy-ittriyli Tm^{3+} :YAG granat-alyuminatlardagi nurlanishli $4f \rightarrow 4f$ o'tishlar magnitoptikasida nokramers NY-ionlari o'yg'otilgan elektron holatlarining tashqi magnit maydoni bilan "aralashish" mexanizmining yetakchi rol o'ynashi ko'rsatib berildi;

past haroratlarda ${}^5S_2 \rightarrow {}^5I_8$ nurlanishli o'tishlarda kuzatilgan granat-gallatdagi Ho^{3+} nokramers NY-ionlarining magnitoptik faolligi (MOF) ning sezilarli katta qiymatlarining 5S_2 va 5I_8 multipletlar energetik spektrlaridagi o'ziga xos kvazidublet (ya'ni "kvaziaynigan") holatlarining mavjudligi bilan bog'liq ekanligi ko'rsatib berildi;

birinchi marotaba $TbAlO_3$ rombik kristallining [110] va "c"-[001] o'qlari bo'ylab o'lgangan yutilish va lyuminessensiya spektrlari va χ magnit singdiruvchanligining eksperimental kattaliklarini solishtirish orqali C_5 simmetriyalik KM da nokramers Tb^{3+} NY-ionining asosiy 7F_6 va 7F_J ($J = 0, 1, \dots, 6$), 5D_J ($J = 3, 4$) qo'zg'algan multipletlarining shtark sathosti to'lqin funksiyalari analitik tuzildi;

8÷300K harorat intervalida magnitofol $TbAlO_3$ ortorombik kristallining [110] kristallografik o'qi bo'yicha amalga oshirilgan optik tadqiqotlar natijalarini solishtirish orqali $TbAlO_3$ rombik kristallning C_5 simmetriyalik KM da ularning to'lqin funksiyalari simmetriyasi va Tb^{3+} NY-ioni multipletlari asosiy 7F_6 va 7F_J ($J = 0, 1, \dots, 6$) larning quyi sathostilari orasidagi shtark energetik intervallari aniqlandi;

birinchi marotaba 85÷300K harorat intervalida $TbAlO_3$ rombik kristallning [110] kristallografik yo'nalishi bo'yicha o'lgangan V Verde doimiysining haroratga bog'liqligi va χ magnit singdiruvchanligi orasidagi farqlar kuzatildi;

78K haroratda $TbAlO_3$ NY-ortoalyuminatining ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$ $4f \rightarrow 4f$ o'tishida aniqlangan yutilish spektrining (chiziqli qutblangan nurda) kuchli anizotropiyasi optik o'tishlarda kombinatsiyalanuvchi Tb^{3+} ioni multipletlarining 7F_6 asosiy va 5D_4 qo'zg'atilgan eng quyi shtark sathostilari to'lqin funksiyalari simmetriyasi xarakteri va C_5 simmetriyalik KM da nokramers Tb^{3+} ioni asosiy holatining kvazidublet xarakteri bilan bog'liq ekanligi aniqlandi. Tadqiqot davomida olingan 7F_6 multiplet spektridagi tashkil etuvchilar va ularning intensivlik taqsimotlari C_5 simmetriyalik KM nazariyasi doirasida amalga oshirilgan sonli hisoblashlar natijalari bilan o'z tasdig'ini topdi.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

past haroratlarda paramagnit terbiy-galliyli va terbiy-aluminiyli granatlarda Tb^{3+} ionining ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$ yutilish polosalaridagi o'lchashlarning natijalari paramagnit

terbiy-galliy va terbiy-aluminiy granatlarida yutilish chizig'idagi zeeman effektining maydon bog'liqliklari o'lchandi va identifikatsiya qilindi;

terbiy-galliyli granatda 85K va 300K haroratlarda o'lchangan magnitoptik (LMSQ, MDD) va optik (yutilish, lyuminessensiya) spektrlarining spektral bog'liqliklarini tahlil qilish natijalari asosida TbGG da 7F_6 , 7F_5 va 5D_4 multipletlarning shtark sathostilari orasida sodir bo'ladigan optik o'tishlar birinchi marotaba aniqlandi;

golmiy-ittriyli Ho^{3+} :YGaG granat-gallatda past haroratlarda spektrning ko'rinadigan sohasida lyuminessensiya spektrida kuzatiladigan ta'qiqlangan $4f \rightarrow 4f$ o'tishlarni identifikatsiyasi amalga oshirildi va bu $4f \rightarrow 4f$ o'tishlar amalga oshishi uchun javobgar markazlashmagan simmetrik KM parametrlari eksperimental aniqlandi;

granat-gallat strukturasiidagi nokramers Ho^{3+} NY-ionining asosiy $4f^{(10)}$ -konfiguratsiyasi 5S_2 , 5I_8 va 5G_5 multipletlarining shtark sathosti to'lqin funksiyalari simmetriyalari turi va energiyalari kattaliklari eksperimental aniqlandi;

Tm^{3+} :YAG dagi ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_4$ nurlanishlar polosasida 78K va 293K haroratlarda lyuminessensiya va LMSQ spektrlari bo'yicha olingan kattaliklar asosida kuzatiladigan optik o'tishlar identifikatsiyasi natijalari, shuningdek granat-alyuminat strukturasiidagi Tm^{3+} NY-ioni 3F_4 , 1D_2 va 3H_6 multipletlarining shtark sathosti to'lqin funksiyalari simmetriyalari aniqlandi;

terbiy-ittriyli $Tb_{0,2}Y_{2,8}Al_5O_{12}$ granat-alyuminatidagi Tb^{3+} ionlarining ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_4$ nurlanishli o'tishlaridagi Zeeman effekti tadqiqotlari natijalari tashqi magnet maydonining nafaqat optik o'tishlarning rezonans chastotalaridagi Zeeman ajralishlariga, balki qarama-qarshi yorug'likning doiraviy qutblanishidagi optik o'tishlar ehtimolliklari modifikatsiyasi bilan bog'liq nurlanish intensivligiga ham kuchli ta'sir qilishini ko'rsatib berdi;

8÷300K harorat intervalida o'lchangan $TbAlO_3$ ortoalyuminatning yutilish va lyuminessensiya spektrlari va $TbAlO_3$ ortorombik kristallning turli kristallografik o'qlari bo'yicha 80K÷300K temperatura intervalida o'lchangan χ magnet singdiruvchanligining haroratga bog'liqligi eksperimental tadqiqotlarining natijalarini solishtirish Tb^{3+} ortoalyuminat strukturasiidagi Tb^{3+} NY-ionining asosiy 7F_6 va uyg'otilgan 5D_4 multipletlari quyi shtark sathostilari to'lqin funksiyalari ko'rinishi va shtark intervallari kattaligini aniqlash imkonini berishi aniqlandi;

rombik kristallning [110] o'qi bo'ylab o'lchangan va shu o'q bo'yicha aniqlangan χ magnet singdiruvchanligining haroratga bog'liqligi bilan solishtirilgan $TbAlO_3$ NY-ortoalyuminatining V Verdi doimiysi haroratga bog'liqligi aniqlanganda 85K÷300K intervalida $TbAlO_3$ NY-ortoalyuminatining faradey aylanishida Van-Flek "aralashish"i hissasining yo'qligini ko'rsatdi;

C_5 simmetriyali KM da Tb^{3+} nokramer NY-ionlarining 7F_6 asosiy va F_J ($J = 0, 1, \dots, 6$), 5D_J ($J = 3, 4$) qo'zg'atilgan shtark sathosti to'lqin funksiyalari simmetriyasining xarakteri, shuningdek ortorombik $TbAlO_3$ kristallining [001] o'qi bo'yicha χ magnet singdiruvchanligining haroratga bog'liqligi aniqlandi;

$TbAlO_3$ NY-ortoalyuminatidagi yutilishning anizotrop qutblanish spektrlarining (chiziqli qutblangan yorug'lik nurida) mumtoz kvant-geometrik

uslubida tahlil qilish va ular asosida optik o'tishlarda kombinatsiyalanuvchi Tb^{3+} nokramers ionlari multipletlarining 7F_6 asosiy va 5D_4 qo'zg'algan shtark sathosti to'liq funksiyalari simmetriyalari aniqlandi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Tadqiqot yakunida o'z aksini topgan tajriba natijalarini boshqa qayd qilish usullari yordamida olingan ma'lumotlar bilan taqqoslash imkonini, shuningdek eksperimental natijalarni nazariy hisob-kitoblar bilan taqqoslash imkoniyati mavjudligidadir. Optik va magnitoptik tadqiqotlarni amalga oshirish jarayonida spektral bog'lanishlarni qayd qilish va qayta ishlashning zamonaviy metodlaridan foydalangan boshqa tadqiqotchilarning olgan ma'lumotlari bilan solishtirish maqsadida olib borilgan parallel tadqiqotlar bilan olingan natijalar ishonchliligi ta'minlandi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati shundan iboratki, olingan natijalarning ilmiy ahamiyati quyi simmetriyali kristall maydonda shakllanuvchi, nokramers NY-ionlarining energetik spektrlari strukturalari haqidagi mavjud tasavvurlarni yetarli darajada chuqurlashtirishga va aniqlashtirishga imkon beradi; bir tomondan Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+} nokramers NY-ionlarining uyg'otilgan elektron holatlari energetik spektrlarida shtark va zeeman ajralishlari orasidagi aloqani aniq ko'rsatib bersa, ikkinchi tomondan NY-ionlari bilan faollashtirilgan granat va ortoalyuminat strukturali paramagnit kristallarning bu aloqalar bilan bog'liq optik, magnit va magnitoptik xususiyatlarini aniqlash imkonini beradi.

Amaliy nuqtai nazardan olingan quyidagi:

spektrning ko'rinadigan va yaqin ultrabinafsha sohalarida NY-granatlari va NY-ortoalyuminatlar asosida ishlaydigan turli xil magnitoptik qutblovchi qurilmalar (modulyatorlar, optik izolyatorlar, displeylar) yaratish;

tadqiq qilingan NY-birikmalarining ($TbAlO_3$, $Ho^{3+}:YGG$ va $Tm^{3+}:YAG$) ham *up*-konversion, ham optik damlashning an'anaviy sxemalarida ishlovchi ko'rinadigan diapazondagi lazerlarda faol muhit sifatida qo'llash imkoniyatlarni beradi.

Tadqiqotning ayrim natijalarini "Kristallarning magnitoptikasi va spektroskopiyasi", "Elektromagnit nurlanishning moddalar bilan o'zaro ta'siri" maxsus kurslari mashg'ulotlarida, shuningdek fizika bilan tutash mutaxassisliklarda tahsil olayotgan talabalarga lazer fizikasi, magnit hodisalari fizikasi kabi fanlarni o'qitishda qo'llash mumkin.

Tadqiqot natijalarining amaliyotda qo'llanilganligi.

Dissertatsiya ishini bajarish mobaynida ishlab chiqilgan optik musbat qayta aloqali fotoelastik qutblovchi modulyatorlardan turli *4f*- va *3d*-birikmalarining MDD, LMSQ spektrlarini va faradey aylanishlarini o'lchashda, shuningdek kam mo'dali optik nurtolalarning qutblash xususiyatlarini tadqiq qilishda foydalanildi. Dissertatsiya ishining D_2 va C_s simmetriyali KM larda nokramers NY-ionlarining elektron holatlari to'liq funksiyalarining koordinatali almashtirishlariga tegishli bo'lgan natijalaridan AQSh olimlari bilan hamkorlikda olib borilayotgan ilmiy tadqiqotlarda foydalanilmoqda. Dissertatsiya ishining ba'zi natijalaridan lazer fizikasi, fizikaviy optika kursidan laboratoriya mashg'ulotlarida foydalanish mumkin.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Dissertatsiya ishini bajarish mobaynida ishlab chiqilgan optik musbat qayta aloqali fotoelastik qutblovchi modulyator, D_2 va C_S simmetriyali KM larda nokramers NY-ionlarining elektron holatlari to'liq funksiyalarining koordinatali almashtirishlariga tegishli bo'lgan natijalariga ko'ra:

disertatsiya ishida Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+} gallas va ortoalyuminat granatlaridagi ichki konfiguratsion o'tishlardagi yutilish spektrlari xususiyatlari bo'yicha olingan natijalar xorijiy jurnallarda (Journal of Rare Earths, Volume 33, № 12, 2015, IF: 4.632; Advanced Optical Materials, Volume 9, № 24, 2021, IF: 9.599; Materials Letters, Volume 65, № 12, 2011, IF: 3.423; Journal of Rare Earths, Volume 33, № 12, 2015, IF: 4.632) Tm^{3+} :YAGdagi $^1D_2 \rightarrow ^3F_4$ nurlanishlar polosasida 78K va 293K temperaturalarda lyuminessensiya va LMSQ spektrlari bo'yicha olingan kattaliklar asosida kuzatiladigan optik o'tishlar identifikatsiyasini amalga oshirish, shuningdek granat-alyuminat strukturasiidagi Tm^{3+} NY-ioni 3F_4 , 1D_2 va 3H_6 multipletlarining shtark sathosti to'liq funksiyalari simmetriyalari turi va energiyalari kattaliklarini aniqlash imkoniyatlarini berdi, shuningdek kam mo'dali optik nurtolalarning qutblanish xususiyatlarini tadqiq qilishda foydalanildi;

disertatsiya ishida tarkibida Tb^{3+} nokramers ionlari bo'lgan kristallarning magnitoptik xususiyatlarini tadqiq qilish bo'yicha olingan natijalardan Rossiya fanlar akademiyasining "Kristallografiya va fotonika" Federal ilmiy-tekshirish markazida kristall muhitlarda magnitoptik effektlarni kuzatish va presizion o'lchashlarni amalga oshirishda qo'llaniladigan metodika ishlab chiqildi (RFA FNIS "Kristallografiya va fotonika" ilmiy markazining 2023-yil 22-noyabr sanasidagi № 9311/41-1180 raqamli dalolatnomasi). Natijada tadqiq qilinayotgan gallas va alyuminat granatlarining magnitoptik xususiyatlarini tadqiq qilish jarayonlarini yaxshilashga erishildi;

Disertatsiya ishida tarkibida Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+} ionlari mavjud bo'lgan gallas va alyuminatlarning optik va magnitoptik xususiyatlarini tadqiq qilish natijasida olingan natijalardan, masalan magnitosirkulyar anizotropiya, magnit sirkulyar dixroizmlardan Uxan universitetida (Xitoy Xalq Respublikasi) olib borilayotgan NY-birikmalari optik va magnitoptik xususiyatlarining fizik mexanizmlarini rivojlantirish bo'yicha olib borilgan tadqiqotlarda foydalanildi (School of Power and Mechanical Engineering Wuhan University ning 2023 yil 27 noyabrdagi dalolatnomasi). Olingan natijalar tadqiq qilingan materiallar magnitoptik xususiyatlarining fizik mexanizmini yanada to'ldirish imkonini berdi.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishining natijalari 13 ta xalqaro va respublika ilmiy-texnik anjumanlarda ma'ruza qilingan va muhoqamadan o'tgan.

Ishning asosiy natijalari «Magnetizm va magnit materiallarida yangiliklar» deb nomlangan XXI xalqaro ilmiy konferensiyasida (Moskva, 2009 yil iyun-iyul), magnetizm bo'yicha Moskva xalqaro simpoziumida - «Moscow International Symposium on Magnetism - MISM» (Moskva, avgust 2011), «Magnetic and Superconducting Materials - MSM» (Xiva, sentabr 2007), 9 - O'zbek-Koreys

simpoziumida «Nanoscience: Problems and Prospects Quantum Functional Materials and Devices» (Toshkent, noyabr 2010), “Zamonaviy fizikaning va fizik ta’limning muammolari” mavzusidagi Respublika ilmiy konferensiyasida va “Zamonaviy fizikada optik usullar” Respublika ilmiy konferensiyasida (Toshkent, 2008g.), «Lazer fizikasi, optika va lazer fizikasining amaliy jihatlari (Toshkent, dekabr 2006) » deb nomlangan ilmiy-amaliy seminarlarda taqdim etilgan.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinishi. Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 24 ta ilmiy nashrlarda e’lon qilingan: jumladan 11ta ilmiy maqola: shulardan 10 tasi chet el ilmiy jurnallarida («Journal of Applied Physics», «Journal of Luminescence», «Journal of Rare-Earth», «Physica Status Solidi (B)», «Optika i Spektroskopiya», «Izvestiya RAN. Ser. Fiz.», «Izvestiya Vuzov. Fizika»), 1 tasi respublika jurnalida, 13 ta tezis va ma’ruzalarda ish natijalari bayon qilingan.

Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi. Dissertatsiya kirish, 7 ta bob, xulosa, 155 nomdagi foydalanilgan adabiyotlar ro’yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiya hajmi 246 betni tashkil etadi, shu jumladan 50 ta rasm va 10 ta jadvallar.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari shakllantirilgan, tekshiruv ob’yekti va predmetlari tavsiflari keltirilgan, O’zbekiston respublikasi fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo’nalishlariga mosligi ko’rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, ularning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarining amaliyotga joriy etilganligi, aprotatsiya natijasi, nashr qilingan maqolalar, dissertatsiyaning tuzilishi bo’yicha ma’lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning «**Paramagnit granatlar va ortoalyuminat kristallaridagi nokramers nodir yer ionlarining magnitooptik, optik va magnit xususiyatlari**» deb nomlangan birinchi bobida paramagnit granatlar va ortoalyuminat kristallardagi nokramers nodir yer ionlarning kristallografik, magnitooptik, optik va magnit xususiyatlari haqidagi batafsil ma’lumotlar va shu paytgacha olib borilgan ishlarning umumiy sharhlari keltirilgan.

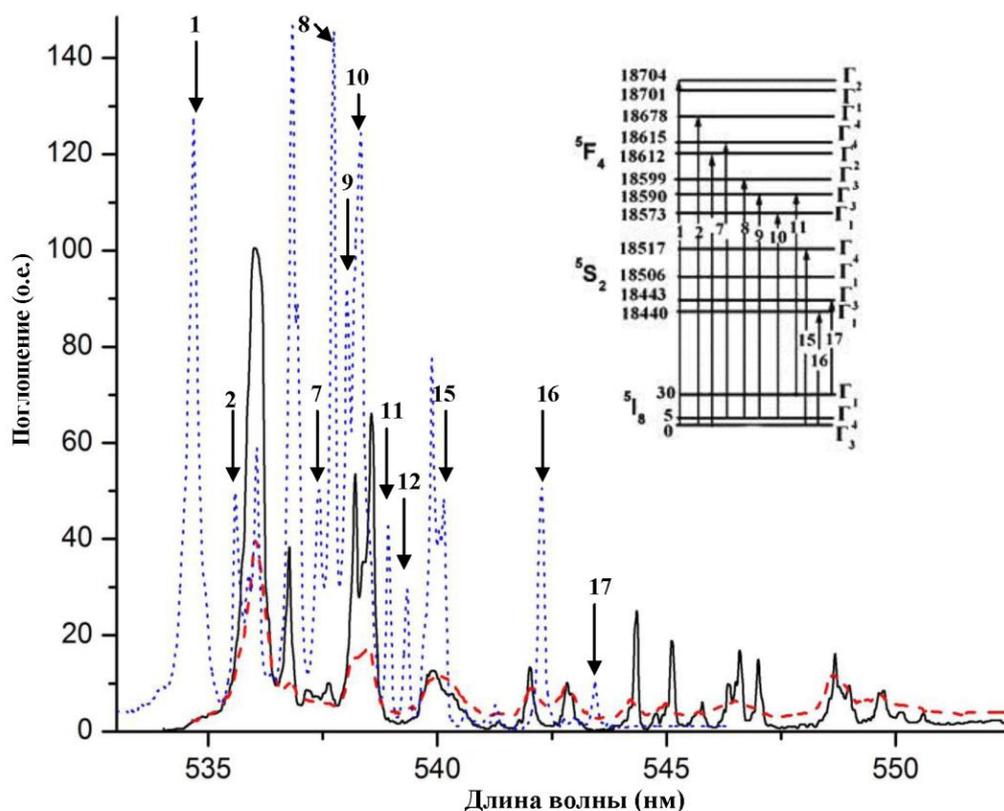
Dissertatsiyaning «**Eksperimental qurilmalar va o’lchash texnikasi. Namunalar**» deb nomlangan ikkinchi bobida o’lchash usullari, optik, magnit va magnitooptik tadqiqotlar uchun qo’llanilgan eksperimental qurilmalar qisqacha bayon qilingan.

Eksperimental tadqiqotlar olib borilgan terbiy-ittriyl $Tb_{0,2}Y_{2,8}Al_5O_{12}$ (TbYAG) granat-alyuminati, golmiy-ittriyl $Ho_{0,2}Y_{2,8}Ga_5O_{12}$ (HoYGG) garant-alyuminati, hamda terbiy $Tb_3Ga_5O_{12}$ (TbGG) va godolin $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) granat-alyuminati monokristallari «eritmada eritma» ga o’z-o’zidan kristallanish usulida o’stirilgan.

Dissertatsiyaning «**Paramagnit granat kristallardagi nokramers nodir yer ionlarining (Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+}) magnitooptik va optik spektrlari**» deb nomlangan uchinchi bobida paramagnit granat kristallardagi nokramers nodir yer

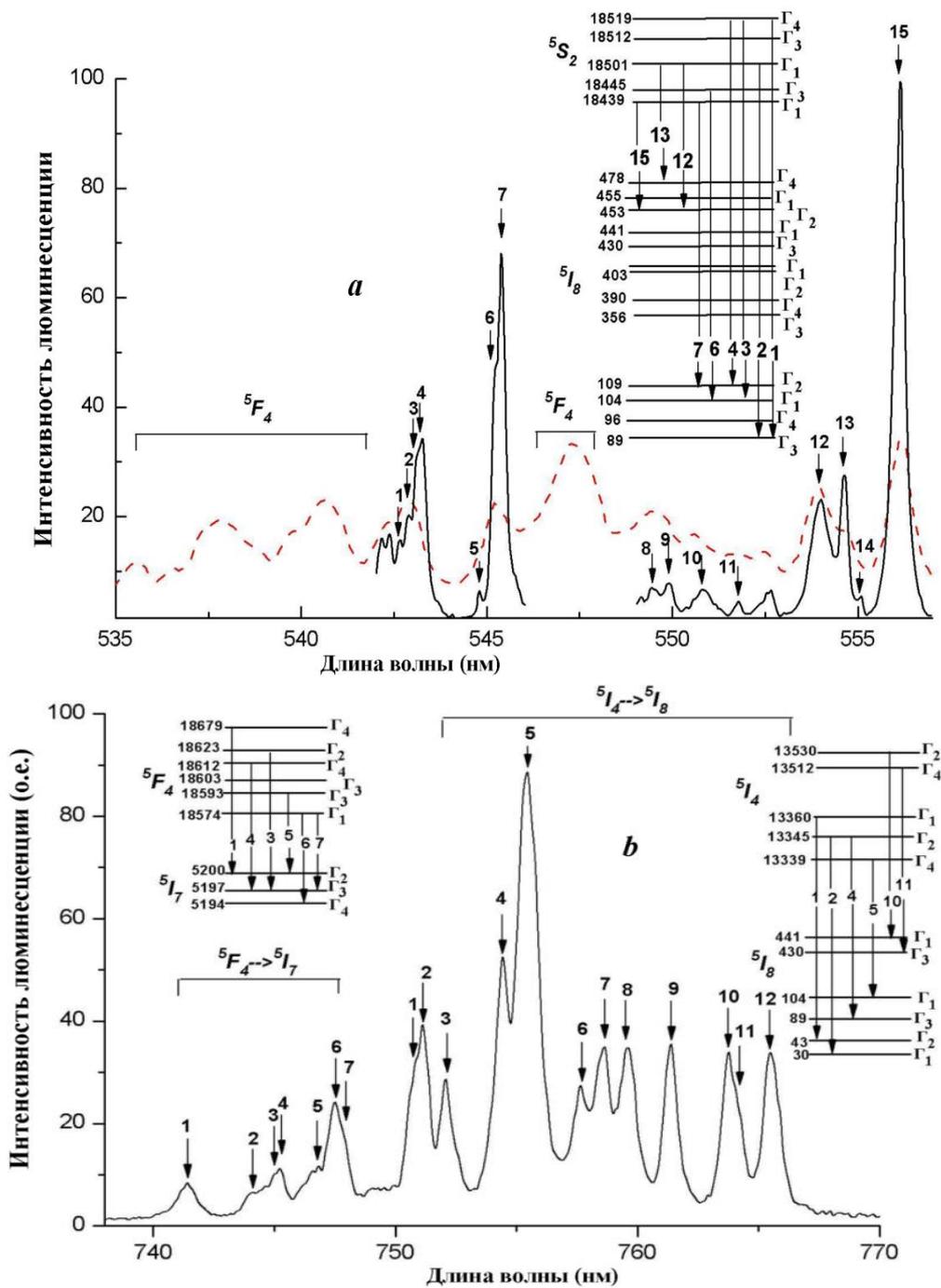
ionlari (Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+}) ustida olib borilgan magnitoptik va tadqiqot natijalari keltirilgan. **1-rasmda** $\text{Ho}^{3+}:\text{YGG}$ ($\text{Ho}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Ga}_5\text{O}_{12}$) granat gallasining $^5\text{I}_8 \rightarrow ^5\text{S}_2$, $^5\text{F}_4$ va $^5\text{I}_8 \rightarrow ^5\text{F}_5$ multipletlarida o'lgangan yutilish spektrlari keltirilgan. **1-rasmdan** aniq ko'rinib turibdiki harorat 85K gacha pasayganda $^5\text{I}_8 \rightarrow ^5\text{S}_2$, $^5\text{F}_4$ yutilish chiziqlaridagi torayadi va ularning amplitudalari bir necha marotaba ortadi. Haroratning 8K gacha pasayishi ba'zi chiziqlarning bir nechta spektrning tashkil etuvchilariga ajralishiga va ular maksimumlarining bir vaqtning o'zida siljishiga olib keladi. Ushbu yutilish diapazonidagi chiziqlarning aksariyati singlet hisoblanadi va Ho^{3+} NY-ionining $^5\text{I}_8$ multipletlarining asosiy holatidan kelib chiqadi va olingan natijalar sonli hisoblashlar natijalari bilan tasdiqlanadi.

$\text{Ho}^{3+}:\text{YGG}$ da $4f \rightarrow 4f$ nurlanishli $^5\text{F}_4 \rightarrow ^5\text{I}_7$, $^5\text{I}_4 \rightarrow ^5\text{I}_8$ va $^5\text{S}_2 \rightarrow ^5\text{I}_8$ o'tishlarda lyuminessensiya spektrlari (**2-rasm**) Ho^{3+} NY-ionining asosiy $4f^{10}$ konfiguratsiyasi $^3\text{H}_4$, $^5\text{G}_4$, $^5\text{G}_5$ va $^5\text{G}_6$ yuqori energiyali multipletlarining foto uyg'onishlari tufayli yuzaga keladi.



1-rasm. $\text{Ho}^{3+}:\text{YGG}$ granat-gallasining 8K (nuqtalar), 85K (uzluksiz chiziq) va 293K (punktir chiziq) haroratlarda o'lgangan yutilish spektrlari. 8K da yutilishning maksimal kattaligi $\sim 27\text{sm}^{-1}$ ni tashkil qiladi. Qo'shimcha ilovada: gallas-granatdagi Ho^{3+} ionining $^5\text{S}_2$, $^5\text{F}_4$ va $^5\text{I}_8$ multipletlaridagi sathostilari orasidagi o'tishlarning optik sxemasi keltirilgan.

Lyuminessensiyaning "yashil" polisasi uchun namuna harorati 293K dan 80K gacha kamayishi 546 dan 555nm gacha ($^5\text{S}_2 + ^5\text{F}_4$) asosiy uyg'otilgan multipletidagi o'tishlar) spektr diapazonida yotuvchi nurlanish chiziqlarining "muzlatilishi" bilan va -1 -7 va -8 -15 ($^5\text{S}_2$ multipleti shtark sathostilari o'tishlari bilan) lyuminessensiya chiziqlari intensivligining bir vaqtning o'zida bu chiziqlarning torayishi amalga oshuvchi o'sishi bilan boradi.

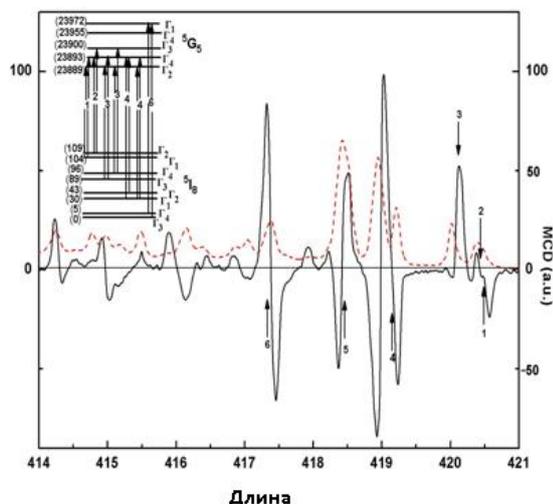


2-rasm. 80K (uzluksiz chiziq) va 293K (uziq chiziq) haroratlarda Ho³⁺:YGG dagi lyuminessensiyaning «yashil»polosasi spektri-(a); 293K haroratda o‘lchangan lyuminessensiya infraqizil polosalari spektri (b). Qo‘shimcha ilovada: $^5F_4 \rightarrow ^5I_7$, $^5I_4 \rightarrow ^5I_8$ va $^5S_2 \rightarrow ^5I_8$ nurlanishli optik o‘tishlar sxemasi.

MDD va optik yutilish spektrlarini taqqoslashdan yaxshi ko‘rinib turibdiki, «paramagnit» C'-hadining hissasi biz tajribada kuzatadigan MDD ning spektral bog‘lanishining 6 yutilish chizig‘ida, shuningdek MDD ning -1, -2 va -3 yutilish chiziqlari yaqinida namoyon bo‘ladigan uncha katta bo‘lmagan assimetriyasida kuzatilar ekan.

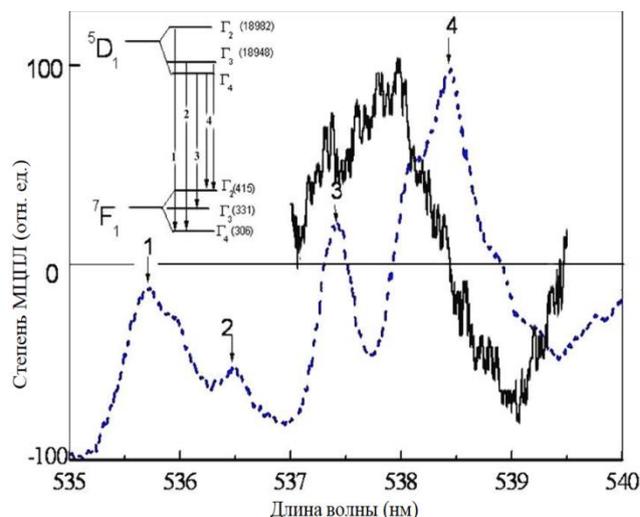
4-rasmda 300K haroratda H=9,0 kE tashqi magnit maydonida GGG dagi Eu³⁺ ionlarining $^5D_1 \rightarrow ^7F_1$ lyuminessensiya chizig‘ida o‘lchangan LMSQ spektri darajalari keltirilgan. -4 nurlanish chizig‘i spektral bog‘lanishi P(v)

Iyuminessensiya chizig'i doirasi markazida effekt ishorasi o'zgaradigan (LMSQ darajasi A-hadi) chiziqli bog'lanish qiyaligidir, ayni chog'da LMSQ ning ikkilamchi nurlanishlarining boshqa qolgan uch chizig'ida ko'rinmaydi.



3-rasm. 80K haroratda $\text{Ho}^{3+}:\text{YGG}$ da yozilgan MDD (uzluksiz chiziq) va optik yutilish (uziq chiziq) spektrlari. MDD (uzluksiz chiziq) spektridagi ${}^5\text{I}_8 \rightarrow {}^5\text{G}_5$ yutilish polosasining xarakterli xususiyatlari vertikal strelkalar orqali nomerlangan.

Qo'shimcha ilovada: ${}^5\text{I}_8$ va ${}^5\text{G}_5$ multipletlarining shtark sathostilari orasidagi magnitoptik faol o'tishlar sxemasi keltirilgan.

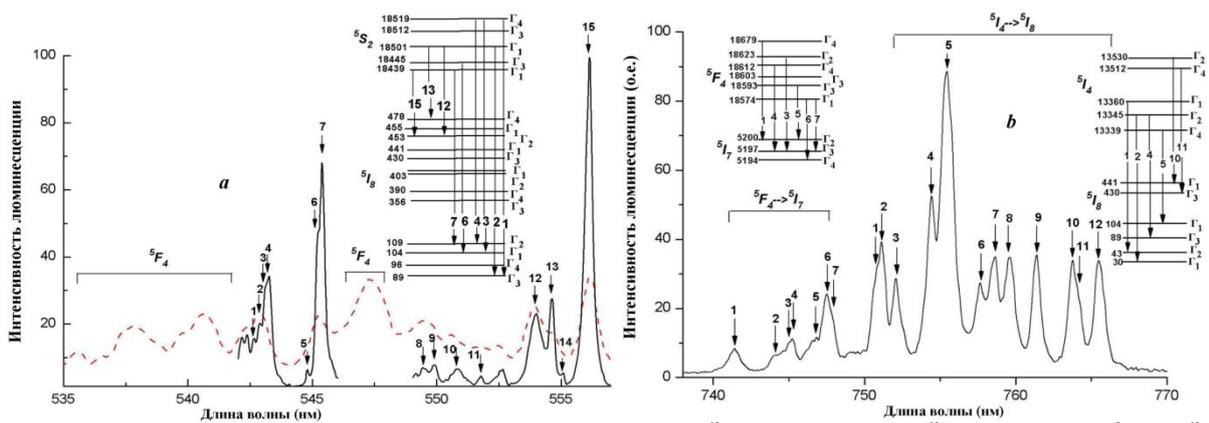


4-rasm. GGG da Eu^{3+} ionlarining ${}^5\text{D}_1 \rightarrow {}^7\text{F}_1$ fluoressensiya polosasida 300K haroratda yozilgan iyuminessensiya (uziq chiziq) va MDD darajalari spektri. 9,0 kE tashqi magnit maydondagi LMSQ darajalari spektri.

LMSQ darajasi hadi A «kvazidublet \rightarrow yakkalangan singlet» magnitoptik faol o'tishida ${}^5\text{D}_1$ multiplet kvazidublet holatining zeeman ajralishi bilan aniqlanadi. Bundan tashqari, ${}^5\text{D}_1$ multipletda kvazidublet sathostilarining simmetriyasini bunday tanlash xuddi LMSQ da shu kvazidublet sathostilaridagi o'tishlar bilan bog'liq boshqa uch -1, -2 va -3 fluoressent chiziqlarida ko'rinmasligi bilan tushuntiriladi, chunki bu holda kombinatsiyalanuvchi holatlarning simmetriyasi LMSQ darajalari hadi A uchun tanlash qoidalarini kanoatlantirmaydi.

MOF ning -A va -C hadlaridagi magnit va elektr maydonlari dipol momentlarining tashkil etuvchilari operatorlari matrik elementlari uchun tanlash qoidalaridan foydalanish (simmetriya bo'yicha) optik o'tishlarda kombinatsiyalovchi holatlar simmetriyasini bevosita aniqlash imkonini beradi.

Tajribalarda kuzatiladigan -1, -2, ... -9 nurlanish chiziqlarining energiyalarini D_2 simmetriyali kristall maydonda (KM) Tm^{3+} NE-ionlari $4f^{12}$ konfiguratsiyasi asosiy energetik sathlarining nazariy sxemalari bilan solishtirish ${}^1\text{D}_2 \rightarrow {}^3\text{F}_4$ iyuminessensiya polosasida -6 va -9 nurlanish chiziqlarida nurlanishli $4f \rightarrow 4f$ o'tishlar simmetrik identifikatsiyalarini amalga oshirish imkonini beradi (**4-rasm**).

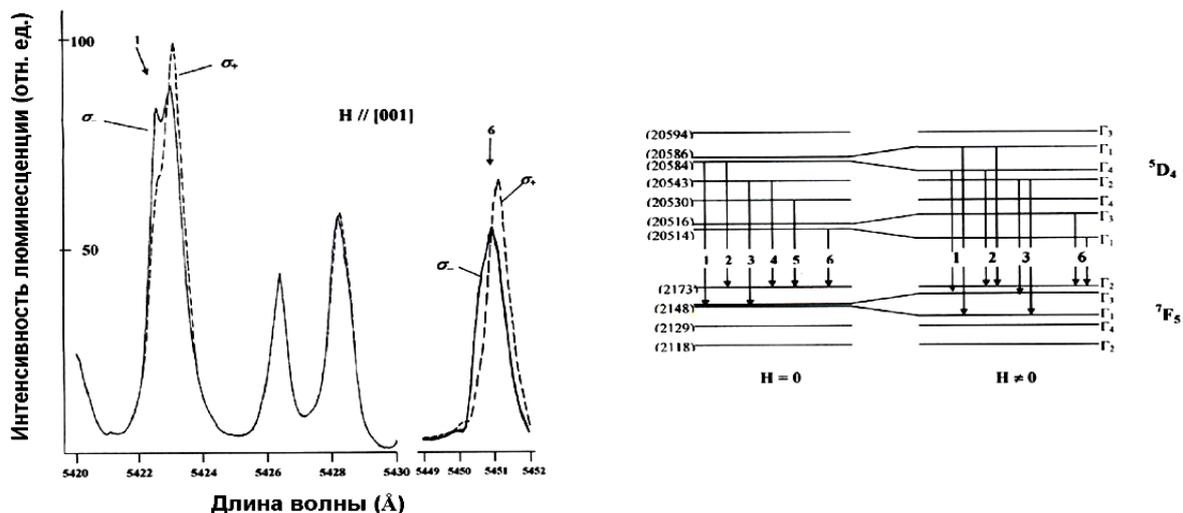


5-rasm. 293K va $H=9.5$ kE tashqi magnit maydonda Tm^{3+} :YAG ning Tm^{3+} ionlaridagi ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_4$ nurlanish polosasida yozilgan LMSQ spektri. Aniqroq ko‘rinishi uchun xuddi shu yerda 78K haroratda (punktir chiziq) ushbu granatning lyuminessensiya spektri fragmenti keltirilgan. Rasmning (b) qismida 78K (uzluksiz chiziq) va 293K (nuqtalar) haroratlarda yozilgan mos nurlanish polosasining spektrlari keltirilgan.

${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_4$ lyuminessensiya polosasida -6 va -9 nurlanish chiziqlarida LMSQ darajalari spektral bog‘lanishlari LMSQning «diamagnit» -A hadi uchun odatiy bo‘lgan simmetrik shaklni beradi (chiziq markazidagi ishorasi almashinuvchi effekt).

-4 va -8 nurlanish chiziqlaridagi magnit qutblangan lyuminessensiyaning o‘ziga xos xususiyatlari paramagnit had (C-had) bilan bog‘liq va asosan 1D_2 multipletda shtark singletlarining yaqin joylashgan holatlari bilan ushbu kvazidublet holatning Van-Flek «aralashishi» mexanizmi orqali shakllanadi.

Dissertatsiyaning «**Terbiy-ittriyli TbYAG aluminiy granatida nodir yer ionlarining Zeeman effekti va elektron holatlarining shtark ajralishi xususiyatlari**» deb nomlangan to‘rtinchi bobida terbiy-ittriyli TbYAG aluminiy granati lyuminessensiya spektrlarida Zeeman effekti tadqiqotlari natijalari keltirilgan.

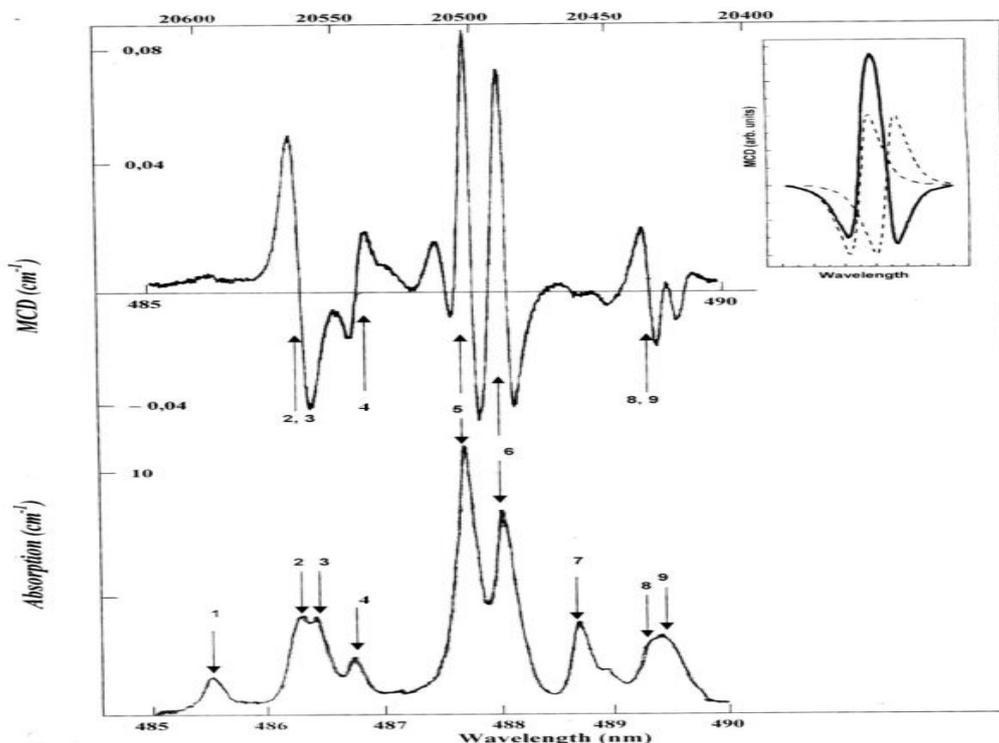


6-rasm. 85K haroratda [001] kristallografik o‘qiga parallel yo‘nalgan $H=7$ kE tashqi magnit maydonda σ va σ^+ spektrlarning -1 va -6 nurlanish chiziqlari. O‘ng tomonda bo‘ylama Zeeman effekti tajriba geometriyasida amalga oshiriladigan magnitoptik faol o‘tishlar sxemasi. Qavslarda sm^{-1} larda berilgan 5D_4 va 7F_5 multipletlar shtark sathostilari energiyalari keltirilgan.

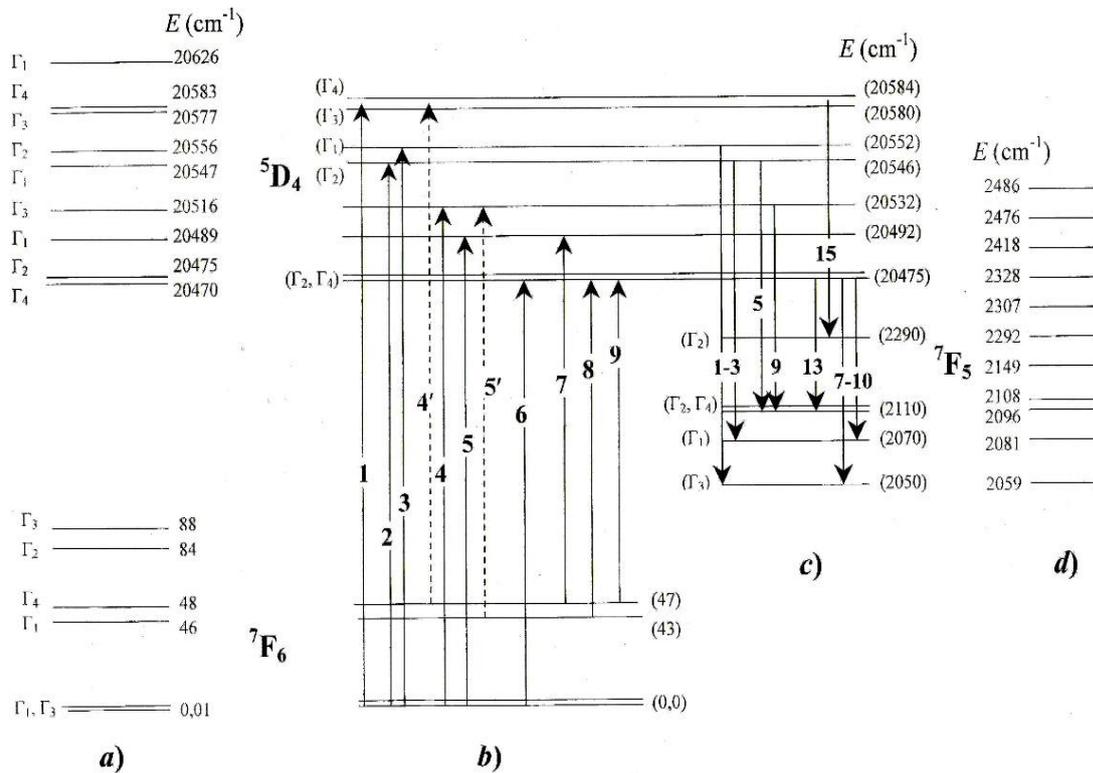
TbYAG ($Tb_{0,2}Y_{2,8}Al_5O_{12}$) granatdagi Tb^{3+} ionlaridagi $4f \rightarrow 4f$ nurlanishdagi $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ o'tishlar orqali aniqlanadigan lyuminessensiyaning «yashil» polosasida Zeeman effektining spektral bog'lanishlarini o'lchash 85K haroratda 7kE tashqi magnit maydonida amalga oshirildi.

5-rasmda [001] kristallografik yo'nalish bo'ylab yo'nalgan tashqi maydonida o'ng σ_+ va chap σ_- sirkulyar qutblanishlarda yozilgan -1 va -6 nurlanish chiziqlaridagi Zeeman effektining spektral bog'lanishlari keltirilgan. Nurlanishlarning -1 va -6 chiziqlari tashqi maydonda uncha katta bo'lmagan zeeman ajralishiga uchrashi bo'ladi, shuningdek teskari sirkulyar qutblanishlarda intensivliklari nisbatan o'zgaradi. Ortogonal sirkulyar σ_+ va σ_- qutblanishlarda (7kE tashqi magnit maydonining o'zgarish yo'nalishlarida) dublet tashkil etuvchilari energetik farqlarining keskin farq qilishi tufayli -1 chiziq ularning aqalli birortasida ham ajratilib aniqlanmaydi. Ortogonal sirkulyar qutblanishlarda H tashqi magnit maydoni orqali indutsirlangan lyuminessensiya chiziqlaridagi intensivlik o'zgarishlari NY-ionlaridagi faol magnitoptik o'tishlar sodir bo'ladigan yaqin joylashgan shtark singletlari to'lqin funksiyalarining «aralashish»i bilan yuzaga keladi.

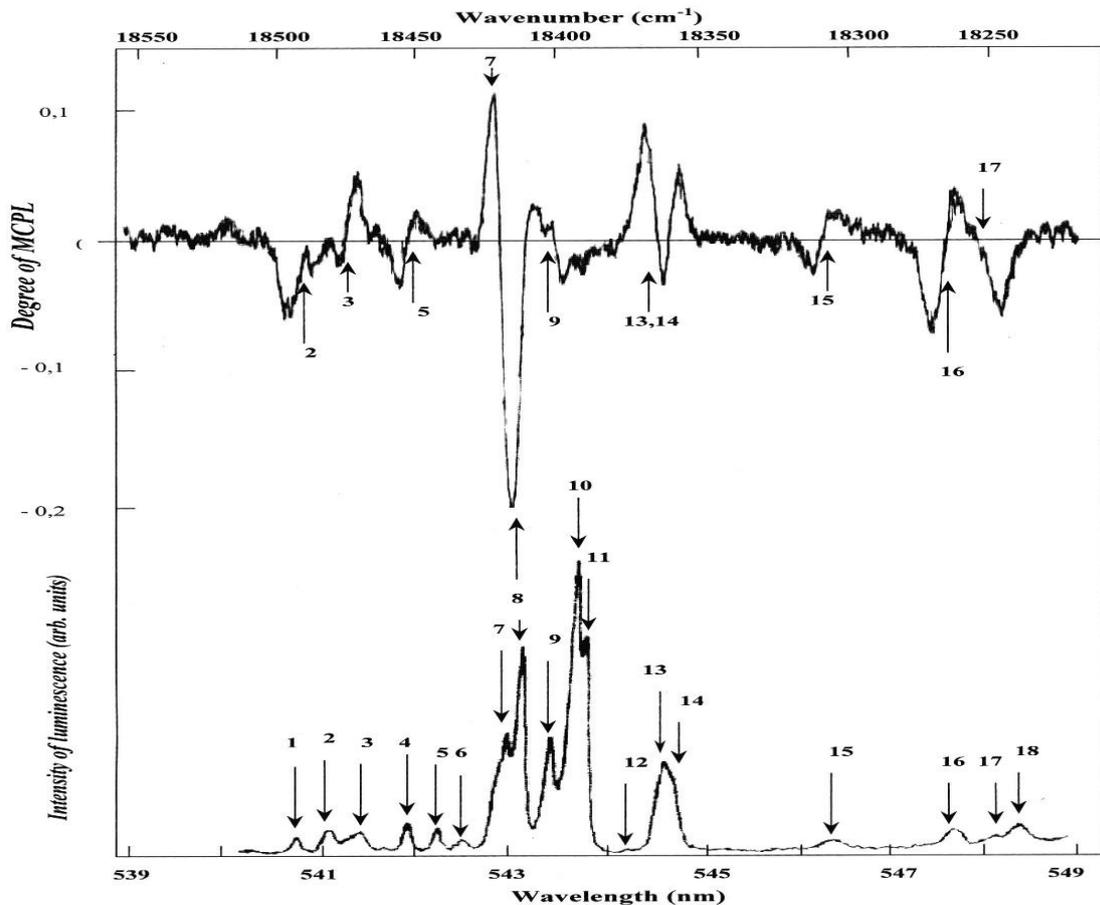
Dissertatsiyaning «Terbiy-galliyli TbGG granatning magnitoptik spektrlarining o'ziga xos xususiyatlari» deb nomlangan beshinchi bobida 80K va 300K haroratlarda spektrning ko'rinadigan sohalarida paramagnit TbGG granatning $4f \rightarrow 4f$ o'tishlarida MDD, LMSQ va optik yutilish spektrlari keltirilgan.



7-rasm. Rasmning yuqori qismida 80K haroratda [011] kristallografik o'qiga parallel yo'nalgan $H=5kE$ tashqi magnit maydonda TbGGda $^7F_6 \rightarrow ^5D_4$ ning yutilish polosasida yozilgan MDD spektri keltirilgan. Qo'shimcha ilovada: bir-biriga nisbatan $\sim 2,5 \div 3,0 \text{ sm}^{-1}$ siljigan ikkita bir xil S ko'rinishdagi egri chiziq (punktir chiziq) farqiga ega MDD spektrining -6 nurlanish chizig'idagi o'ziga xos xususiyatlarini modellashtirish natijalari keltirilgan.



8-rasm. TbGG (a, b, c, d) da Tb³⁺ NY-ionining ⁵D₄, ⁷F₅ va ⁷F₆ multipletlari shtark ajralishi enegetik spektri komponentlari orasidagi optik o'tishlar sxemasi keltirilgan.



9-rasm. Rasmning yuqori qismida 80K haroratda [110] kristallografik o'qiga parallel yo'nalgan H=7kE tashqi magnit maydonda TbGG da ⁵D₄→⁷F₅ ning nurlanish polosasida yozilgan LMSQ spektri keltirilgan.

Biz olgan eksperimental kattaliklar asosida (**7-rasm**) ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$ ning yutilish polosasida kuzatiladigan chiziqlar bilan $4f \rightarrow 4f$ optik o'tishlar identifikatsiyasi natijalari, shuningdek TbGG dagi Tb^{3+} ionining 7F_6 va 5D_4 multipletlari shtark sathostilari va to'liqin funksiyalarining energiyalarini sonli hisoblash natijalari **8-rasm**da ko'rsatilgan.

9-rasmning yuqori qismida ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ nurlanishli o'tishda 80K haroratda yozilgan terbiy-galliyl granatning LMSQ spektri ko'rsatilgan. Terbiy-galliyl granatning LMSQ va MDD spektrlarining tahlili (**7 va 9 rasm**) shuni ko'rsatdiki, biz tajribalarda kuzatadigan -2, -3 va -4 yutilish chiziqlarida MDD natijaviy spektral bog'lanishlarining uncha katta bo'lmagan assimetriyasida MOF ning C-hadi namoyon bo'lar ekan. Qolgan chiziqlarda esa, MOF ning A-hadi namoyon bo'lishi kuzatildi. -9, -13 va -14 yutilish chiziqlarida LMSQ darajalari A'-hadning paydo bo'lishi $\sim 2110 \text{ sm}^{-1}$ energiyada 7F_5 multipleti spektrida (G_2, G_4) kvazidubletning mavjudligi tufayli sodir bo'ladi. -7, -8, -10, -11 va -15 lyuminessensiya chiziqlarida eksperimental aniqlangan LMSQ darajalari A'-hadning mavjud emasligi 5D_4 multipletida (G_2, G_4) va (G_3, G_4) kvazidubletlar sathostilarining zeeman ajralishlari bilan tushuntirilishi mumkin..

Dissertatsiyaning «**Ortoalyuminatlardagi nokramers nodir yer ionlarining Faradey effekti tabiati**» deb nomlangan oltinchi bobida $TbAlO_3$ NY-ortoalyuminatning yutilish va lyuminessensiya spektrlaridagi optik o'tishlarning identifikatsiyasi, shuningdek [110] kristallografik yo'nalishlari bo'ylab $TbAlO_3$ ning o'lgangan teskari magnet qabul qiluvchanligining temperaturaga bog'liqliklari tahlili natijalari keltirilgan.

10-rasmda keltirilgan grafikdan yaxshi ko'rinib turibdiki, $\chi_{[110]}^{-1}$ kattalikning haroratga bog'liqligi T harorat ortishi bilan unga nochiziqli bog'langan holda o'zgaradi. [110] o'qi bo'ylab NY-terbiy ortoalyuminati magnet xususiyatlarining bunday tabiati NY-panjaraostilarining natijaviy magnet momentiga 7F_6 multipleti shtark sathostilarining xuddi shu multipletning asosiy kvazidublet to'liqiniga uyg'ongan to'liqin funksiyalarining tashqi H magnet maydoni «aralashishi» mexanizmi hissasi bilan tushuntirilishi mumkin. **10-rasm** ilovasida $TbAlO_3$ da Tb^{3+} ioni 7F_6 asosiy multipletining quyi shtark sathosti 9 ta holatining Van-Flek aralashishi sxematik ko'rsatilgan.

Rombik kristallning "ab"-tekisligida $TbAlO_3$ ning molyar magnet singdiruvchanligi χ_{VV} ni hisoblash uchun yaxshi ma'lum bo'lgan Van-Flek kelib chiqishiga ega bo'lgan quyidagi ifodadan foydalanildi

$$\chi_{[110]}^{(m)} = \frac{1}{2}(\chi_a^{(m)} + \chi_b^{(m)}) = \frac{1}{2}(\chi'^{(m)} + 2\Delta\chi_{V-V}^{(m)}) = g_0^2 \mu_B^2 N_A \left\{ \sum_{n \neq m} \left[\rho_n \frac{|\langle n / \hat{J}_z / m \rangle|^2}{E_m - E_n} \right] + 2 \sum_{i \neq k} \left[\frac{|\langle i / \hat{J}_x / k \rangle|^2}{E_i - E_k} \rho_k \right] \right\} \quad (1)$$

$$\chi_a^{(m)} = (\chi'^{(m)} \cos^2 \alpha_0 + \Delta\chi_{V-V}^{(m)}) \quad (2)$$

$$\chi_b^{(m)} = (\chi'^{(m)} \sin^2 \alpha_0 + \Delta\chi_{V-V}^{(m)}) \quad (3)$$

bu yerda g_0 – NY-ioni asosiy multipletining Lande faktori (Tb^{3+} ioni uchun $g_0 = 1.5$); μ_B – Bor magnetoni; N_A – Avogadro soni; $n \neq m$; $|n\rangle, |m\rangle$ i $|i\rangle, |k\rangle$ - aynimagan shtark singletlari holatlarining tashqi magnet maydoni bilan «aralashishi» haqiqiy

to‘lqin funksiyalari; E_n , E_m – ularning energiyalari; ρ_i – sathlarning bolsman to‘ldirilishi.

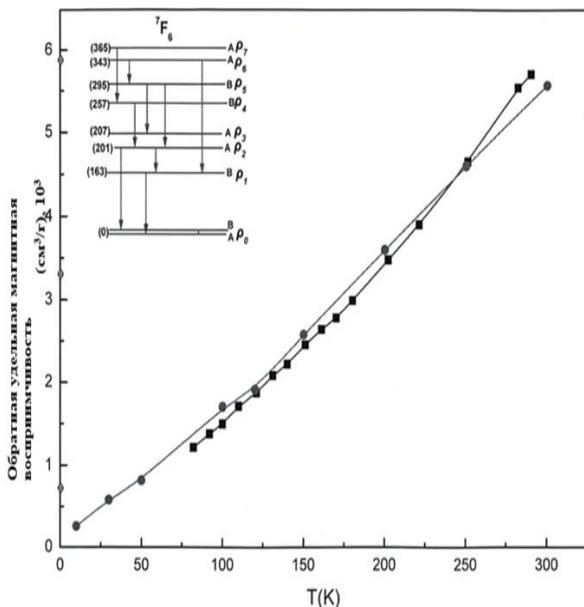
Bu o‘lchamlar ortoalyuminat tarkibidagi asosiy 7f_6 multipletlari orasida va shtark sathostlarida sodir bo‘ladigan optik o‘tishlarni identifikatsiyalash bilan birgalikda, Tb^{3+} NY-ionining asosiy $4f^{(8)}$ konfiguratsiyasi ${}^{2S+1}L_J$ qo‘zg‘algan multipletlarining shtark sathosti energiyalarini aniqlashga imkon beradi. Aniqlik uchun, **10-rasmda** 7f_6 multipletining $> 200\text{sm}^{-1}$ energiyasida joylashgan asosiy holatidan yutilish va nurlanish diapazonlarining o‘ziga xos xususiyatlari qo‘zg‘algan shtark singletlaridan o‘tishini tavsiflovchi, vertikal o‘qlar Z_6 va Z_7 bilan ko‘rsatilgan.

Bizning fikrimizcha, ushbu ishda amalga oshirilgan $TbAlO_3$ NY-ortoalyuminatining yutilish va lyuminessens spektrlaridagi optik o‘tishlarni aniqlash – bu ortoalyuminatning ortorombik kristallining turli kristallografik yo‘nalishlari bo‘ylab o‘lchangan χ magnit singdiruvchanligining haroratga bog‘liqligini Tb^{3+} NY-ionining KMning C_5 simmetriyasida hisoblangan nazariy o‘xshashliklarini bog‘lash bilan taqqoslash, natijalarning to‘g‘riligini qo‘shimcha tasdiqlaydi. Misol tariqasida, 10-rasmda Tb^{3+} ortoalyuminati 7F_6 ionining asosiy multiplet xolatidan $\approx 200\text{sm}^{-1}$ energiyada joylashgan Z_4 , Z_5 shtark singletlarining qo‘zg‘algan to‘lqin funksiyalari bilan (Z_1 , Z_2 kvazidubletining) asosan eng past to‘lqin holatlarining H tashqi maydoni bilan “aralashuvi” bilan shartlangan $TbAlO_3$ ortorombik kristallning, “c” o‘qi atrofida o‘lchangan teskari o‘ziga xos χ_c magnit singdiruvchanlikning haroratga bog‘liqligi ko‘rsatilgan.

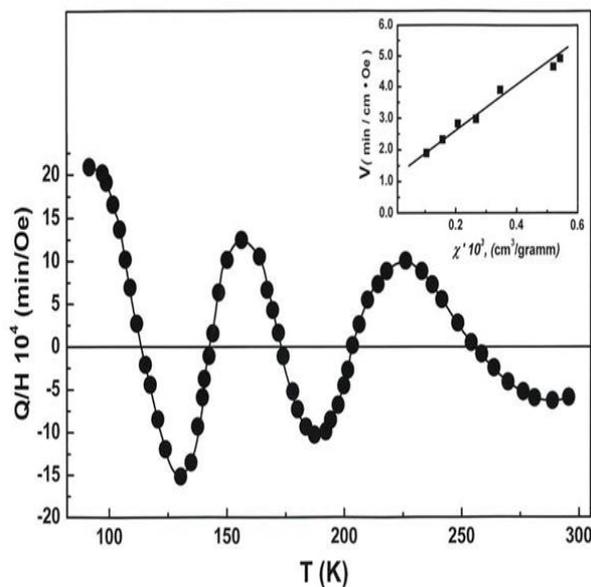
Bu bobda $TbAlO_3$ ning [110] kristallografik yo‘nalishi bo‘ylab o‘lchangan teskari magnit singdiruvchanlikning haroratga bog‘liqligi ham ko‘rib chiqilgan. Bu shundan dalolat beradiki, $T > 100\text{K}$ harorat oralig‘ida $\chi_{[110]}^{-1}$ magnit singdiruvchanlikning haroratga bog‘liqligini 7F_6 multipleti 163 sm^{-1} va 199 sm^{-1} energiyasi ostidagi qo‘zg‘algan shtark osti to‘lqin funksiyalari bilan o‘sha multipletning asosiy kvazidublet to‘lqin funksiyalarini shakllantirishda muhim ahamiyatga ega ekanligini ko‘rsatib beradi va NY-panjara ostidagi magnit holatining tashqi “aralashuv”i muhim natijaviy ahamiyatga ega ekanligi va bu harorat chiziqli bo‘lmagan holda o‘zgarishi ko‘rsatib o‘tilganligi shundan guvohlik beradi.

(1) formulada $\chi^{(m)}$ qo‘shiluvchi 7F_6 multipletning shtark sathostlarining bolsman to‘ldirilishidagi farqi bilan yuzaga keladigan NY-alyuminati magnit singdiruvchanligi (bo‘ylama sindiruvchanlik deb ataluvchi) dagi hissa hisoblanadi. Bu formuladagi ikkinchi qo‘shiluvchi $\Delta\chi_{v-v}^{(m)}$ - bu izotrop xarakterga ega bo‘lgan sindiruvchanlikdagi Van-Flek hissasi.

10-rasmdan yaxshi ko‘rinib turibdiki, $80\div 300\text{K}$ harorat intervalida olingan tajriba natijalari nazariy hisoblash natijalari bilan yaxshi mos keladi, bu esa o‘z navbatida ortoalyuminat strukturasi 7F_6 asosiy multiplet 9 quyi shtark sathostlari to‘lqin funksiyalari simmetriyasini guruhli-nazariy identifikatsiya qilishning to‘g‘ri ekanligini qo‘shimcha ravishda tasdiqlash uchun xizmat qiladi.



10-rasm. TbAlO₃ [101] kristalli magnet singdiruvchanligi $\chi_{[110]}$ ning haroratga bog‘liqligi: (---) – (1-3) formula yordamidagi hisoblash natijalari; (qora kvadratchalar) – o‘lchash natijalari. Ilovada: rombik kristallning berilgan magnitlanish geometriyasida TbAlO₃ da Tb³⁺ ioni ⁷F₆ asosiy multipletlari 9 ta quyi shtark singletlari holatlarining tashqi magnet maydoni bilan Van-Flek «aralashish»i sxemasi keltirilgan.

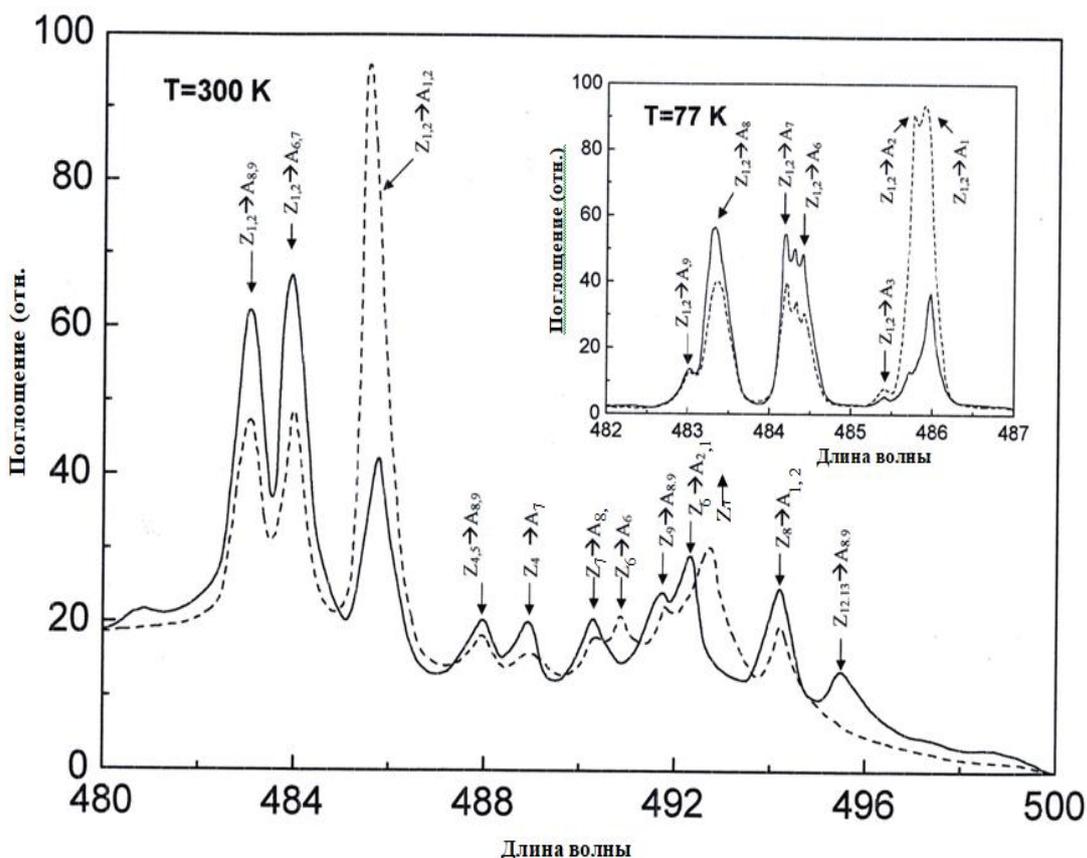


11-rasm. Qutblanish ellipsining katta o‘qi burilish burchagi θ ning $\lambda=506$ nm to‘lqin uzunligida TbAlO₃ rombik kristallning [110] o‘qi bo‘ylab o‘lchangan haroratga bog‘lanishlari. Ilovada: $\lambda=506$ nm to‘lqin uzunligida TbAlO₃ rombik kristallning [110] o‘qi bo‘ylab o‘lchangan V Verde doimiysining bo‘ylama magnet singdiruvchanligiga bog‘liqligi keltirilgan.

Faradey effektining tahlili shuni ko‘rsatdiki, Verde doimiysi V ning tabiati harorat pasayganda TbAlO₃ rombik kristalli magnet singdiruvchanligi $\chi_{[110]}^{(m)}$ ning tabiati bilan mos tushmaydi, ya’ni to‘laligicha bo‘ylama deb ataluvchi, ya’ni haroratga bog‘liq tashkil etuvchi $\chi^{(m)}$ bilan aniqlanadi. Bu hol **11-rasmdagi** ilovadan yaxshi ko‘rinib turibdi, ya’ni u yerda Verde doimiysi V ning $\lambda=506$ nm to‘lqin uzunligida $\chi^{(m)}$ ga bog‘liqligi (tajriba xatoligi $\sim 5\%$ gacha bo‘lganda) chiziqli ekanligi ko‘rsatilgan.

Nazariy-guruhiy fikr yuritishlar asosida dissertatsiyada amalda [110] romboedrik kristallografik yo‘nalishi bo‘ylab o‘lchangan TbAlO₃ ning faradey aylanishida Van-Flek «aralashish» mexanizmining hissasining to‘la mavjud emasligini xarakterlovchi $V_{[110]}$ Verde doimiysining haroratga bog‘liqligining bunday tabiatini tushuntirish usuli taklif qilindi.

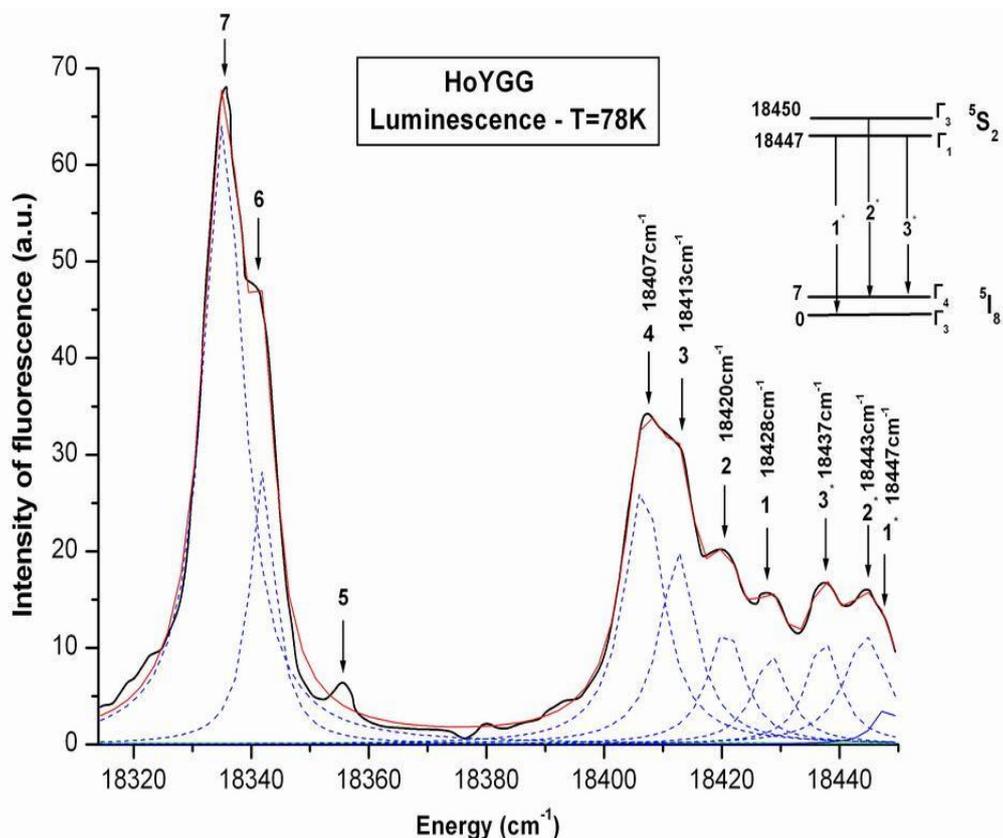
Dissertatsiyaning «**Quyi simmetriyali kristall maydonlardagi Ho³⁺ va Tb³⁺ nokramers NE-ionlari optik spektrlarining o‘ziga xos xususiyatlari**» deb nomlangan yettinchi bobida 78K va 300K haroratlarda ⁷F₆ → ⁵D₄ polosasida chiziqli qutblangan yorug‘likda ($\vec{E} // c$ va $\vec{E} \perp c$ - o‘qlar, bu yerda \vec{E} - yorug‘lik to‘lqini elektr vektori) yozilgan TbAlO₃ ortoaluminatning yutilish spektrlari hamda golmiy-ittriyli YGG:Ho³⁺ granat gallasning lyuminessensiya (fluorensensiya) nisbiy intensivlik chiziqlari uchun eksperimental aniqlangan natijalar hisob-kitobi keltirilgan.



12-rasm. Ikkita ortogonal chiziqli yorug'lik qutblanishida 300K haroratda ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$ o'tishda yozilgan $TbAlO_3$ NE-ortoalyuminati yutilish spektrlari: $E//c$ - (uzluksiz chiziqlar) va $E \perp c$ - (uziq chiziqlar) rombik kristall o'qlari [110]. Ilovada: 78K haroratdagi yutilishning qutblanish spektrlari.

300K haroratda ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$ yutilish polosasida kuzatiladigan optik o'tishlarning simmetriyasi identifikatsiyasi natijalari (**12-rasm**) va C_5 simmetriyasi kristall maydonda 7F_6 va 5D_4 multipletlar energetik spektrlarining sonli hisob kitoblari shuni ko'rsatdiki, o'tishlar asosan multipletlarning kombinatsiyalanuvchi turli simmetriyasi shtark singletlari orasida ($A \rightarrow V$ yoki $V \rightarrow A$ singletlar orasida) yuzaga kelar ekan. Ayni damda $\sim 496\text{nm}$ to'lqin uzunligi yaqinida yotuvchi yutilish chiziqlari yakkalangan simmetriyasi shtark singletlaridan shakllangan 7F_6 va 5D_4 multipletlar uyg'ongan holatlari (kvazidubletlar) orasidagi o'tishlar tufayli yuzaga keladi, bu esa qutblangan yorug'likdagi ushbu chiziqning keskin anizotropiyasini tushuntirib beradi.

13-rasmda 78K haroratda ${}^5S_2 \rightarrow {}^5I_8$ nurlanishli o'tishda yozilgan $YGG:Ho^{3+}$ granatning lyuminessensiya spektri keltirilgan. Ushbu rasmda 78K haroratda o'lchangan $YGG:Ho^{3+}$ ning lyuminessensiya spektrining gauss tashkil etuvchilari bo'yicha qatorga yoyilganligi keltirilgan. $-2'$, -7 , -12 va -15 larning mos yutilish chiziqlariga yuzalar nisbati kattaliklarini baholash quyidagilarni ko'rsatadi: $\langle S_7 \rangle / \langle S_2 \rangle \sim 10 \div 12$ va $\langle S_{15} \rangle / \langle S_{12} \rangle \sim 1,3 \div 1,7$.



13-rasm. 78K haroratda o‘lchangan YGG:Ho³⁺ ning lyuminessensiya spektrining Gauss tashkil etuvchilari bo‘yicha qatorga yoyilgan.

Ikkinchi tomondan, YGG da Ho³⁺ ioni ⁵S₂ va ⁵I₈ multipletlari shtark sathostilari to‘lqin funksiyalaridan foydalanib, shuningdek D₂ simmetriyali “kuchsiz” KM yaqinlashishida yuqorida ko‘rsatib o‘tilgan optik nurlanishli 4f→4f o‘tishlar matrits elementlarini topish mumkin. ⁵S₂ multipleti shtark sathostilarining ρ_i(i=1,2,...5) bolsman to‘ldirilishlaridan foydalangan holda mos «o‘tish kuchlarini» hisoblashlar, nazariy hisoblash va lyuminessensiya chiziqlarining tajribada aniqlangan qiymatlariga to‘la mos kelishini ko‘rsatadi, chunki tajribalarda aniqlangan lyuminessensiyaning -7, -2’ va -15, -12 chiziqlari intensivliklari nisbatlari mos ravishda kattaliklar darajasi tartibida quyidagi:

$$\frac{|\langle \psi_{77} / D_Z^{(1)} / \psi_8 \rangle|^2 \cdot \rho_1}{|\langle \psi_{78} / D_Z^{(1)} / \psi_2 \rangle|^2 \cdot \rho_2} = 8,1 \text{ va } \frac{|\langle \psi_{77} / D_Z^{(1)} / \psi_{15} \rangle|^2 \cdot \rho_1}{|\langle \psi_{79} / D_Z^{(1)} / \psi_2 \rangle|^2 \cdot \rho_3} = 1,74$$

nazariy hisoblash natijalariga yetarlicha yaqin.

XULOSA

O‘tkazilgan ilmiy tadqiqotlar asosida «Paramagnit granatlar va ortoalyuminat kristallaridagi nokramers nodir yer ionlarining magnitoptik va optik spektroskopiyasi» mavzusi bo‘yicha olib borilgan ilmiy tadqiqotlar asosida quyidagi natijalar olindi:

1. Mazkur dissertatsiya ishida birinchi marotaba golmiy-ittriylil HoYGaG granat-gallatda va tarkibida Eu³⁺ NY-ionlari mavjud bo‘lgan gadoliniy-galliyli

GGG granatda asosiy $4f^{(n)}$ konfiguratsiyali multipletlarining shtark sathosti energiyalari topildi. Ularning magnitoptik (LMSQ, MDD) va optik (yutilish, lyuminessensiya) effektlari spektral bog‘lanishlari tahlili asosida ular orasida sodir bo‘ladigan optik o‘tishlari identifikatsiyasi amalga oshirildi. Shuningdek, ${}^5S_2 \rightarrow {}^5I_8$ nurlanishli o‘tishlarda granat-gallatda Ho^{3+} nokramers NY-ioni past haroratlarda aniqlangan MOF ligining yetarlicha katta qiymatlari 5S_2 va 5I_8 multipletlar energetik spektrlaridagi «kvazidublet» (ya’ni, «kvaziaynigan») holatlar mavjudligi bilan bog‘liq ekanligi aniqlandi.

2. Tuliyy-ittriyli TmYAG granat-alyuminatda asosiy $4f^{(n)}$ konfiguratsiyali multipletlarining shtark sathostilarining energiyalari aniqlandi va past haroratlarda kuzatiladigan magnitoptik (LMSQ, MDD) va optik (yutilish, lyuminessensiya) effektlar spektral bog‘lanishlari tahlili asosida ular orasidagi optik o‘tishlar identifikatsiyalari amalga oshirildi. Tuliyyli Tm³⁺:YAG granat-alyuminatda nurlanishli $4f \rightarrow 4f$ o‘tishlarda nokramers NY-ionining uyg‘otilgan elektron holatlarining tashqi magnit maydon ta’sirida «aralashishi» mexanizmi muhim rol o‘ynashi ko‘rsatib berildi.

3. Birinchi marta ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$ yutilish polosasida magnit doiraviy dixroizm (MDD) spektrlari tadqiq qilindi va identifikatsiyalandi, shuningdek 80 va 300K temperaturalarda terbiy-galliyli va terbiy-ittriyli galliyli granatlarda ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ lyuminessensiya polosalarida lyuminessensiya magnit sirkulyar qutblanish (LMSQ) spektri tadqiq qilindi.

4. TbGaG da 7F_6 , 7F_5 va 5D_4 mutipletlar shtark sathostilari orasida sodir bo‘ladigan optik o‘tishlar identifikatsiyasi magnitoptik va optik spektrlarning spektral bog‘lanishlari tahlili asosida amalga oshirildi. Ushbu multipletlar shtark sathostilarining energiyalari va to‘lqin funksiyalarining tajribada aniqlangan simmetriya indeksleri terbiyli gallat-granatda Tb³⁺ nodir yer ioni energetik spektrlarini sonli hisoblash natijalari to‘g‘ri ekanligini ko‘rsatib berildi.

5. Birinchi marotaba 85÷300K harorat intervalida TbAlO₃ rombik kristallning [110] o‘qi bo‘ylab o‘lchangan magnit singdiruvchanligi χ va Verde doimiysi V ning haroratga bog‘lanishlaridagi farqlar aniqlandi. Kuzatilgan effekt asosiy $4f^{(8)}$ -konfiguratsiyaning 7F_6 multipleti quyi shtark sathostilari to‘lqin funksiyalarining aniqlangan xarakteri va C_5 simmetriyali kristall maydonida Tb³⁺ ionining aralashgan va uyg‘ongan $4f^{(7)}$ $5d$ – konfiguratsiyasi 7D_5 multipleti shtark sathostilaridagi magnitoptik faol $4f \rightarrow 5d$ o‘tishida ular bilan kombinatsiyalanuvchi energetik sathlarning aniqlangan xarakterli faradey aylanishlarida Van-Flek mexanizmining mavjud emasligi bilan tushuntirildi.

6. Dissertatsiya ishida aniqlangan 78K haroratda TbAlO₃ NY-alyuminatining ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$ $4f \rightarrow 4f$ o‘tishidagi yutilish spektrida (chiziqli-qutblangan yorug‘likda) kuchli anomaliyaning optik o‘tishlarda kombinatsiyalanuvchi Tb³⁺ionlari multipletlarining asosiy 7F_6 va uyg‘ongan 5D_4 quyi shtark sathosti to‘lqin funksiyalari simmetriyasining aniqlangan xarakteri, hamda C_5 simmetriyali KM da nokramers Tb³⁺ ioni asosiy holatining kvazidublet harakteri bilan bog‘liq ekanligi

ko'rsatib berildi. Shuningdek, uning mavjudligi C_S simmetriyada KM nazariyasi doirasida amalga oshirilgan energetik spektrlarning sonli hisoblashlari orqali o'z tasdig'ini topdi.

7. Shuningdek, golmiy-ittriylı granat gıllatning ($YGG:Ho^{3+}$) $^5S_2 \rightarrow ^5I_8$ nurlanishli (fluorensensiya) o'tishlarida lyuminessensiya chiziqlarining intensivliklari tadqiqot jarayonida aniqlandi va sonli hisoblashlar olib borildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ ИМЕНИ ШАРОФА РАШИДОВА**

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА
ИМЕНИ МИРЗО УЛУГБЕКА**

РАХИМОВ ШАРОФ АМОНОВИЧ

**МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ
РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ НЕКРАМЕРСОВСКИХ ИОНОВ В
КРИСТАЛЛАХ ПАРАМАГНИТНЫХ ГРАНАТОВ И
ОРТОАЛЮМИНАТОВ**

01.04.09 – Физика магнитных явлений

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
ДОКТОРА (DSc) ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

Самарканд – 2024

Тема диссертации доктора (DSc) физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при министерство высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № В.2024.1.DSc/FM174.

Диссертация выполнена в Национальном университете Узбекистана им.М.Улугбека

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

Научный консультант:

Валиев Уйгун Вахидович

доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Мукимов Камил Мукимович

академик АНРУз., доктор физико-математических наук, профессор

Шарипов Мирзо Зокирович

доктор физико-математических наук, профессор

Эшчанов Баходир Худайбергенович

доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация:

Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова

Защита диссертации состоится «18» 05 2024 г. в 12⁰⁰ часов на заседании ученого совета PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 при Самаркандском государственном университете имени Шарофа Рашидова. (Адрес: 140104, г. Самарканд, Университетский бульвар, 15. Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40; e-mail: rektor@samdu.uz Самаркандский государственный университет имени Шарофа Рашидова, Институт инженерной физики, 1-этаж, 114-аудитория).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Самаркандского государственного университета имени Шарофа Рашидова (зарегистрирована под №28). Адрес: 140104, г. Самарканд, Университетский бульвар, 15.Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40.

Автореферат диссертации разослан «02» 05 2024 г.
(протокол рассылки № 91 от «01» 05 2024 г.).




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


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


О. Кувандиков
Председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (DSc) диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. Современная магнитооптическая спектроскопия редкоземельных (РЗ) соединений, возникшая на стыке двух фундаментальных областей физики – *физической оптики и физики магнитных явлений* – включает в себя широкий спектр теоретических и экспериментальных исследований по анизотропии оптических свойств различных редкоземельных материалов (кристаллов, стекол и т.п.), проявляющихся во внешнем магнитном поле H .

На сегодняшний день в мире широкие возможности магнитооптических методов, оказываются, чрезвычайно полезными и информативными при детальном изучении энергетических спектров и симметрии электронных состояний некрамерсовских (с четным числом электронов в незаполненной 4f-оболочке) РЗ-ионов в кристаллах. Это связано с тем, что применение современных методов оптической спектроскопии РЗ - соединений ("hot-band" spectroscopy, поляризационная спектроскопия с селективным оптическим возбуждением - SSPS) сталкивается с определенными трудностями в интерпретации оптических спектров РЗ-ионов с четным числом 4f-электронов (т.н. некрамерсовские ионы), так как экспериментально наблюдаемое число компонент в их спектрах и распределение интенсивности в них не совпадает с теоретическими предсказаниями. Это связано с возникновением в энергетических спектрах некрамерсовских ионов т.н. «квазидублетной» структуры, которая непосредственно не разрешается в оптических экспериментах. В значительной степени, трудности в интерпретации оптических спектров некрамерсовских ионов (Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+} и т.д.) в гранатах могут быть преодолены, если запрещенные (в электродипольном приближении) $4f \rightarrow 4f$ переходы изучаются с помощью методов линейной дифференциальной магнитооптической спектроскопии, такими как, магнитный круговой дихроизм - МКД, магнитная циркулярная поляризация люминесценции - МЦПЛ и т.п. С одной стороны, основным источником возникновения МКД и МЦПЛ является квантовомеханическое "смешивание" внешним магнитным полем H волновых функций близкорасположенных невырожденных (то есть "квазивырожденных") штарковских подуровней основного и возбужденных мультиплетов некрамерсовского иона, комбинирующих в оптическом переходе, что позволяет позиционировать «квазидублетные» состояния в энергетическом спектре РЗ-иона. С другой, применение правил отбора по симметрии (группа D_2) для матричных элементов оптических переходов дает уникальную возможность определения симметрии волновых функций штарковских подуровней (включая квазидублеты), с которых (или на которые) происходят оптические переходы. Поэтому комплексное использование оптических, магнитных и магнитооптических методов исследований позволяет получить важную, практически недоступную для других физических методов

исследований экспериментальную информацию о возбужденных электронных состояниях некрамерсовских РЗ-ионов в кристаллах гранатов и ортоалюминатов.

В настоящая время, для развития фундаментальных наук 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 и центров высоких технологий. По этому со стороны государства уделяется большое внимание научно-экспериментальным методам исследования, к которым относятся методы оптической, магнитной и магнитооптической спектроскопии РЗ-соединений. Эти методы исследования привлекают внимание научных исследователей не только нашей страны, но и представителей научных центров различных стран мира.

Полученные результаты исследований в данной диссертационной работе послужат повышению престижа научно-исследовательской деятельности Республики Узбекистан. Данное диссертационное исследование 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 инновационных 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, других нормативно-правовых документах имеющих отношение к данной области деятельности.

Соответствие исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики. Данное исследование является частью развития науки и техники Республики Узбекистан: II «Энергетика, энергосбережение и ресурсосбережение, транспорт, машины и оборудование; современная электроника, микроэлектроника, фотоника, разработка электронных приборов» и приоритеты ПФИ-2 «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации¹: В минувшие два десятилетия XXI века в ведущих мировых научно-исследовательских центрах, включая такие как: Department of Physics, San Jose State University, San Jose (USA), The of School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan (China), The Katholieke Universiteit, Leuven (Belgium), в Московском Государственном университет (МГУ), в Институте

¹Обзор международных научных исследований по теме диссертации проведен на основе: <https://journals.aps.org>, <https://ufn.ru>, <https://www.elsevier.com>, <https://apps.webofknowledge.com>, iopscience.iop.org, journals.ioffe.ru, Web of Science, Scopus, Springer. Research.

кристаллографии им. А.В. Шубникова (РАН), в Институте общей физики им. А.Н. Прохорова (Россия), Институте физики (Красноярск) им. Л.В. Киренского, в Харьковском физико-техническом институте низких температур (ФТИНТ, Украина), и в Национальном университете Узбекистана (НУУз) проводятся интенсивные теоретические и экспериментальные исследования оптических, магнитных и магнитооптических свойств редкоземельных (РЗ) магнетиков.

По научному направлению диссертационной работы на мировом уровне решен ряд актуальных проблем и получены важные научные результаты в области магнитооптики и оптики РЗ-соединений, включая такие как: с использованием методов теории кристаллического поля (КП) рассчитаны энергетические спектры и волновые функции трехвалентных РЗ-ионов Tb^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} , Eu^{3+} и т.п. в кристаллических полях симметрии D_2 и C_5 (San Jose State University, Katholieke Universitet), исследованы в широком интервале температур спектры поглощения и люминесценции РЗ-гранатов и ортоалюминатов, допированных РЗ-ионами Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} и Dy^{3+} при низких температурах (НУУз, МГУ, ФТИНТ и т.д.), исследованы также спектры зеемановского расщепления различных крамерсовских (Dy^{3+} , Er^{3+}) и некрамерсовских (Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+}) РЗ-ионов в кристаллах гранатов (алюминатов и галлатов) при низких температурах, вплоть до 4,2 К (НУУз совместно с ФТИНТ, Институтом физики РАН, Красноярск), проведены измерения магнитного кругового дихроизма (МКД) и эффекта Фарадея (ЭФ) в РЗ парамагнитных стеклах (Институт физики РАН), в кристаллах РЗ-гранатов и ортоалюминатов в широком диапазоне длин волн и температур (НУУз, ФТИНТ). Впервые детально исследованы спектры магнитной циркулярной поляризации люминесценции (МЦПЛ) иттрий-алюминиевого граната активированного РЗ-ионами Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Dy^{3+} , Er^{3+} в видимой области спектра в широком интервале температур (НУУз, WuhanUniversity). В настоящее время во многих странах мира в перспективных направлениях, в частности, в спин-электронике, магнитоэлектронике, в современном материаловедении активно проводятся научно – исследовательские работы по исследованию магнитооптических свойств РЗ-парамагнитных соединений применяемых для создания магнитооптических модуляторов, дефлекторов, оптических затворов в фотонике.

Степень изученности проблемы. В настоящее время экспериментальный поиск и теоретическое исследование кристаллов редкоземельных (РЗ) соединений, намагничивание которых индуцирует рекордные изменения их оптических характеристик (вплоть до $\sim 50 \div 100\%$) представляет собой перспективное научное направление. Подобного рода оптико-магнитные явления, в которых поворотом внешним магнитным полем результирующего магнитного момента подрешетки РЗ-ионов (или спин-системы для переходных ионов) в кристалле можно непосредственно управлять появлением, исчезновением и смещением линейно- или

циркулярно–поляризованных компонент линий в спектрах поглощения или люминесценции можно назвать *управляемой магнитным полем оптикой магнитоактивных ионов* (в отличие от чисто магнитооптических эффектов – Фарадея, Керра и Коттона-Муттона). Первые эксперименты по управляемой магнитным полем оптике РЗ-ионов, проведенные на монокристаллах редкоземельных ферритов-гранатов (РЗФГ), наглядно продемонстрировали возможность осуществления резкой перестройки инфракрасных спектров поглощения некоторых ферритов-гранатов (при повороте намагниченности граната сравнительно слабым внешним магнитным полем). Эффективное магнитное поле (или т.н. обменное поле), действующее на РЗ-ион в магнитоупорядоченном кристалле и превышающее на 3÷4 порядка взаимодействие отдельного РЗ-иона с внешним магнитным полем, приводит к возникновению эффекта Зеемана, но с увеличенными на 2÷3 порядка интервалами между зеемановскими компонентами линии поглощения. Подобный физический механизм управления оптическими свойствами РЗ-ионов в кристаллах редкоземельных ферритов-гранатов (РЗФГ) и редкоземельных ортоферритах (РЗОФ) приводит к возникновению оптико-магнитных и магнитооптических эффектов, представляющих существенный интерес для практических приложений, для длин волн инфракрасного (ИК) диапазона 1.5÷5мкм. Это обстоятельство значительно сужает область их практического применения и позволяет добиться лишь ограниченного успеха при создании магнитоуправляемых оптических устройств (модуляторов, оптических вентилях лазерного излучения и других магнитооптических устройств). Поэтому в дальнейшем стали рассматриваться и изучаться другие физические механизмы управления оптическими свойствами РЗ – ионов, принципиально отличающиеся от традиционно рассматриваемого в магнитооптике механизма зеемановского расщепления квантовых состояний РЗ-ионов в парамагнитных кристаллах. Например, в 80-х годах прошлого века было показано, что учет “смешивания” внешним магнитным полем волновых функций основного и возбужденных состояний РЗ-иона с волновыми функциями близлежащих к ним энергетических уровней может привести к значительному различию в интенсивностях зеемановских компонент линий поглощения (или излучения). В связи с этим, большой интерес, проявляемый в последнее время к оптическим исследованиям оксидных соединений редкоземельных ионов связан в первую очередь с широкими перспективами их возможных практических применений. Так, например, соединения на основе оксидов редкоземельных 4f – ионов представляются весьма перспективными материалами для использования их в качестве активных сред в лазерах видимого и УФ диапазонов (функционирующих как в *up-conversion*, так и в традиционной схемах оптической накачки), в высокоэффективных лазерных матрицах, в люминесцентных экранах полевых эмиссионных дисплеях, в модуляторах и

оптических вентилях лазерного излучения в системах оптической связи и т.п. Поэтому в данной работе выполнены оптические и магнитооптические (включая, магнитные) исследования таких штарковских подуровней РЗ-ионов, “смешивание” состояний которых внешним магнитным полем H приводит к возникновению значительных по величине оптико-магнитных эффектов проявляющихся в появлении, исчезновении и смещении узких линейно- или циркулярно-поляризованных компонент линий в спектрах поглощения или люминесценции в кристаллах РЗ-гранатов и ортоалюминатов. Основное внимание было сфокусировано на РЗ-ионах Tb^{3+} , Dy^{3+} , Er^{3+} , Pr^{3+} , взаимодействие которых с магнитным полем H (в условиях оптической накачки) может привести к дополнительному, имеющему селективный характер заполнению магнитных подуровней возбужденных состояний магнитоактивных ионов. Физически оно может проявиться в аномальном перераспределении населенностей возбужденных состояний РЗ-ионов, населенность которых в отсутствии оптической накачки имеет чисто термодинамически равновесный характер даже во внешнем поле H . Существенную роль в подобном селективном заселении вырожденных (либо “квазивырожденных”) штарковских подуровней близко расположенных друг к другу (по энергии), играет симметрия волновых функций обеспечивающая их эффективное “смешивание” во внешнем магнитном поле H (механизм Ван-Флека). В ряде случаев это может приводить к возникновению инверсии населенностей возбужденных энергетических состояний основной $4f^n$ конфигурации РЗ-ионов, имеющих метастабильный характер и представляющих интерес при создании квантовых усилителей и генераторов микроволнового диапазона. В связи с этим, в данной диссертационной работе была поставлена задача детального экспериментального исследования особенностей штарковского и зеемановского расщепления электронных состояний крамерсовских и некрамерсовских РЗ-ионов в РЗ-соединениях с кристаллографической структурой граната и ортоалюмината с использованием оптических, магнитных и магнитооптических методов измерений.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Данная диссертационная работа была выполнена в Национальном Университете Узбекистана им. Мирзо Улугбека в рамках госбюджетной тематики кафедры оптики и лазерной физики физического факультета НУУз и гранта ОТ - Ф2 - 064 Комитета Координации Развития Науки и Технологии при Кабинете Министров РУз.

Целью исследования является проведение экспериментальных и теоретических исследований особенностей магнитных, оптических и магнитооптических свойств некрамерсовских РЗ-ионов Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+} в кристаллах гранатов и ортоалюминатов, обусловленных нетривиальным характером штарковского расщепления их энергетических спектров,

формирующихся в низкосимметричных кристаллических полях (КП) D_2 и C_2 симметрии, характерными для кристаллического окружения РЗ - ионов в парамагнитных соединениях ортоалюминатов и гранатов (алюминатов и галлатов).

Задачи исследования:

На основе использования теории интенсивности $4f \rightarrow 4f$ переходов Джадда-Офельта и теоретико-групповых методов выполнить идентификацию оптических $4f \rightarrow 4f$ переходов, экспериментально наблюдаемых в кристаллах со структурой граната, допированных некрамерсовскими редкоземельными ионами Ho^{3+} и Tm^{3+} .

Найти энергии штарковских подуровней мультиплетов основной $4f^{(n)}$ конфигурации в гольмий-иттриевом гранате-галлате HoYGG , в тулий-иттриевом гранате-алюминате TmYAG и гадолиний-галлиевом гранате (GGG) с ионами Eu^{3+} , а также выполнить идентификацию оптических переходов, происходящих между ними на основе анализа спектральных зависимостей магнитооптических (МЦПЛ, МКД) и оптических (поглощение, люминесценция) эффектов.

Провести исследование спектров зеемановского расщепления на излучательном $4f \rightarrow 4f$ переходе ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ в тербий-иттриевом гранате-алюминате $\text{Tb}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Al}_5\text{O}_{12}$ при низких температурах с целью изучения вклада эффекта «смешивания» в магнитооптику некрамерсовских ионов Tb^{3+} в структуре граната.

На основе анализа спектральных зависимостей магнитооптических и оптических спектров тербиевых галлатов-гранатов выполнить как идентификацию штарковских подуровней мультиплетов основной $4f^{(n)}$ и смешанной возбужденной $4f^{(n-1)}5d$ конфигураций РЗ-иона Tb^{3+} в структуре галлата-граната, так и оптических переходов происходящих между ними.

Исследовать спектры поглощения РЗ-ортоалюмината TbAlO_3 , ориентированного в плоскости [110] орторомбического кристалла в диапазоне длин волн $480 \div 294$ нм в интервале температур $8 \div 300\text{K}$ и спектры люминесценции на излучательных $4f \rightarrow 4f$ переходах ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_J$ ($J = 0, 1, \dots, 6$) в ионах Tb^{3+} в TbAlO_3 в интервале температур $85 \div 300\text{K}$.

Исследовать температурные зависимости магнитной восприимчивости χ ортоалюмината TbAlO_3 в интервале температур $T = 80 \div 300\text{K}$ вдоль кристаллографических осей [110] и [001] орторомбического кристалла и температурные зависимости фарадеевского вращения иона Tb^{3+} в структуре ортоалюмината TbAlO_3 в интервале температур $85 \div 300\text{K}$, длин волн $420 \div 750$ нм в кристаллографическом направлении [110] ромбического кристалла.

Исследование особенностей оптических спектров некрамерсовских РЗ-ионов Ho^{3+} и Tb^{3+} в кристаллическом поле низкой симметрии, а также экспериментальное подтверждение схемы расчета параметров кристаллического поля.

Объект и предмет исследования Объектами исследований явились монокристаллы тербиевого ортоалюмината $TbAlO_3$, тербий-иттриевого граната-алюмината $Tb_{0,2}Y_{2,8}Al_5O_{12}$ (TbYAG), тулий-иттриевого граната-алюмината $Tm_xY_{3-x}Al_5O_{12}$, гольмий-иттриевого граната-галлата $Ho_{0,2}Y_{2,8}Ga_5O_{12}$ (HoYGG), а также, тербиевого, $Tb_3Ga_5O_{12}$ (TbGG) и гадолиниевого $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) гранатов-галлатов.

Предметом исследования являются оптические, магнитные и магнитооптические свойства указанных РЗ-соединений, исследуемые в широких интервалах температур, длин волн и магнитных полей.

Методы исследований. Для измерений магнитооптических свойств РЗ-кристаллов гранатов и ортоалюминатов использовались методы дифференциальной магнитооптики - МКД, МЦПЛ и эффект Фарадея (ЭФ), а также, традиционной зеемановской спектроскопии. Измерения оптических свойств осуществлялись на основе исследований спектров оптического поглощения, спектров флуоресценции и спектров возбуждения люминесценции (СВЛ). Магнитные свойства указанных выше РЗ-соединений исследовались на магнитометре с колеблющимся образцом (т.н. вибромагнитометр). Расчеты энергетических спектров и волновых функций некрамерсовских РЗ-ионов Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+} в кристаллических полях орторомбической (D_2) и моноклинной (C_2) симметрии, выполнялись с использованием современных вычислительных методов теории кристаллического поля (КП).

Научная новизна исследования состоит в том, что впервые продемонстрирован доминирующий вклад эффекта квантомеханического «смешивания» волновых функций электронных состояний магнитоактивных ионов в спектральные и температурные зависимости магнитооптических эффектов, наблюдаемых в кристаллах гранатов и ортоалюминатов, активированных некрамерсовскими РЗ-ионами Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+} . Это утверждение базируется на нижеперечисленных оригинальных экспериментальных результатах, полученных в рамках данной диссертационной работы:

Проведенный симметричный анализ и учет эффекта «смешивания» позволил связать аномальное поведение зеемановского расщепления линий в полосе поглощения ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$ в тербий-галлиевом гранате с $4f \rightarrow 4f$ оптическими переходами между штарковскими подуровнями мультиплетов 7F_6 и 5D_4 иона Tb^{3+} в TbGaG, для которых полевые зависимости расщепления принципиально отличаются от хорошо известных полевых зависимостей зеемановского расщепления на большинстве линий поглощения между штарковскими подуровнями этих же мультиплетов, как в тербиевом гранате-галлате, так и в тербиевом гранате-алюминате TbAG в продольном магнитном поле.

Показано, что найденные симметрии волновых функций и энергии штарковских подуровней мультиплетов 7F_6 , 7F_5 и 5D_4 в TbGG из сопоставления спектров степени МЦПЛ и МКД, с одной стороны, спектров поглощения и люминесценции, с другой, подтверждают результаты

численных вычислений энергетического спектра редкоземельного иона Tb^{3+} в тербиевом галлате-гранате.

Впервые показано, что в магнитооптике излучательных $4f \rightarrow 4f$ переходов в тулий-иттриевом гранате-алюминате $Tm^{3+}:YAG$ доминирует механизм «смешивания» внешним полем H возбужденных электронных состояний некрамерсовского РЗ-иона.

Показано, что значительная величина магнитооптической активности (МОА) некрамерсовского РЗ-иона Ho^{3+} в гранате-галлате, обнаруженная при низких температурах на излучательном переходе $^5S_2 \rightarrow ^5I_8$ однозначно связана с наличием «квазидублетных» (т.е. «квазивырожденных») состояний в энергетических спектрах мультиплетов 5S_2 и 5I_8 .

Впервые на основе результатов сопоставления экспериментальных данных по спектрам поглощения, люминесценции и магнитной восприимчивости χ , измеренных вдоль оси $[001]$ - «с» и оси $[110]$ ромбического кристалла $TbAlO_3$ аналитически построены волновые функции штарковских подуровней основного 7F_6 и возбужденных мультиплетов $^7F_J (J = 0, 1, \dots, 6)$, $^5D_J (J = 3, 4)$ некрамерсовского РЗ-иона Tb^{3+} в КП симметрии C_5 .

Из сопоставления данных оптических исследований, выполненных в температурном интервале $8 \div 300K$ вдоль кристаллографической оси $[110]$ магнитоактивного орторомбического кристалла $TbAlO_3$ экспериментально определены величины штарковских энергетических интервалов между нижайшими подуровнями основного 7F_6 и $^7F_J (J = 0, 1, \dots, 6)$, $^5D_J (J = 3, 4)$ мультиплетов РЗ – иона Tb^{3+} и симметрия их волновых функций в КП C_5 симметрии ромбического кристалла $TbAlO_3$.

Впервые обнаружено различие температурных зависимостей постоянной Верде V и магнитной восприимчивости χ , измеренных вдоль кристаллографического направления $[110]$ ромбического кристалла $TbAlO_3$ в интервале температур $85 \div 300K$.

Обнаруженная сильная анизотропия спектра поглощения (в линейно-поляризованном свете) РЗ-ортоалюмината $TbAlO_3$, на $4f \rightarrow 4f$ переходе $^7F_6 \rightarrow ^5D_4$, при температуре $T=78K$ обусловлена, как определенным характером симметрии волновых функций нижайших штарковских подуровней основного 7F_6 и возбужденного 5D_4 мультиплетов иона Tb^{3+} комбинирующих в оптическом переходе, так и квазидублетным характером основного состояния некрамерсовского иона Tb^{3+} в КП симметрии C_5 . Его наличие в спектре мультиплета 7F_6 также подтверждено результатами численных расчетов энергетического спектра, выполненных в рамках теории КП симметрии C_5 .

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

1. Результаты измерений полевых зависимостей эффекта Зеемана в полосе поглощения $^7F_6 \rightarrow ^5D_4$ иона Tb^{3+} в парамагнитных тербий-галлиевом и тербий-алюминиевом гранатах при низких температурах и их интерпретация.
2. Результаты анализа спектральных зависимостей магнитооптических (МКД, МЦПЛ) и оптических (поглощение, люминесценция) спектров,

измеренных при $T=85\text{K}$ и 300K в тербий-галлиевом граната, на основе которых впервые выполнена идентификация оптических переходов происходящих между штарковскими подуровнями мультиплетов ${}^7\text{F}_6$, ${}^7\text{F}_5$ и ${}^5\text{D}_4$ в TbGG.

3. Результаты идентификации запрещенных (в электродипольном приближении) $4f \rightarrow 4f$ переходов, наблюдаемых в спектрах люминесценции в видимой области спектра при низких температурах в гольмий-иттриевом гранате-галлате $\text{Ho}^{3+}:\text{YGaG}$ и экспериментального определения параметров нецентросимметричного КП, ответственного за «разрешение» $4f \rightarrow 4f$ переходов.

4. Найденные экспериментально из магнитооптических экспериментов величины энергий и тип симметрии волновых функций штарковских подуровней ${}^5\text{S}_2$, ${}^5\text{I}_8$ и ${}^5\text{G}_5$ мультиплетов основной $4f^{(10)}$ -конфигурации некрамерсовского РЗ-иона Ho^{3+} в структуре граната-галлата.

5. Результаты идентификации оптических переходов, наблюдаемых в полосе излучения ${}^1\text{D}_2 \rightarrow {}^3\text{F}_4$ в $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$ при температурах $T = 78\text{K}$ и 293K на основе данных по спектрам люминесценции и МЦПЛ, а также, найденные экспериментально из магнитооптических экспериментов величины энергий и тип симметрии волновых функций штарковских подуровней ${}^3\text{F}_4$, ${}^1\text{D}_2$ и ${}^3\text{H}_6$ мультиплетов РЗ-иона Tm^{3+} в структуре граната-алюмината.

6. Результаты исследований эффекта Зеемана на излучательном $4f \rightarrow 4f$ переходе ${}^5\text{D}_4 \rightarrow {}^7\text{F}_5$ в ионах Tb^{3+} в тербий-иттриевом гранате-алюминате $\text{Tb}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Al}_5\text{O}_{12}$, демонстрирующие сильное влияние внешнего магнитного поля не только на зеемановские расщепления резонансных частот оптических переходов, но и на интенсивности линий излучения, обусловленных модификацией вероятностей оптических переходов в противоположных световых циркулярных поляризациях.

7. Результаты сопоставления данных экспериментальных исследований спектров поглощения и люминесценции ортоалюмината TbAlO_3 измеренных в интервале температур $8 \div 300\text{K}$ и температурных зависимостей магнитной восприимчивости χ измеренных в диапазоне температур $80 \div 300\text{K}$ вдоль разных кристаллографических осей орторомбического кристалла TbAlO_3 , позволившие определить величины штарковских интервалов и вид волновых функций нижайших штарковских подуровней основного ${}^7\text{F}_6$ и возбужденного ${}^5\text{D}_4$ мультиплетов РЗ – иона Tb^{3+} в структуре ортоалюмината.

8. Обнаруженные особенности поведения температурной зависимости постоянной Верде V РЗ - ортоалюмината TbAlO_3 , измеренной вдоль оси $[110]$ ромбического кристалла, сопоставление которой с аналогичной зависимостью магнитной восприимчивости χ (ось $[110]$) показало неожиданное отсутствие вклада Ван-Флекавского «смешивания» электронных состояний иона Tb^{3+} в фарадеевское вращение РЗ– ортоалюмината TbAlO_3 в интервале температур $T = 85 \div 300\text{K}$.

9. Экспериментально и аналитически найденный характер симметрии волновых функций штарковских подуровней основного ${}^7\text{F}_6$ и возбужденных

мультиплетов 7F_J ($J = 0, 1, \dots, 6$), 5D_J ($J = 3, 4$) некрамерсовского РЗ-иона Tb^{3+} в КП симметрии C_S , а также, вычисленная на их основе температурная зависимость магнитной восприимчивости χ вдоль оси $[001]$ - «с» орторомбического кристалла $TbAlO_3$.

10. Оригинальный квантово-геометрический метод анализа анизотропных поляризационных спектров поглощения (в линейно-поляризованном свете) в РЗ-ортоалюминате $TbAlO_3$ и определения на его основе симметрии волновых функций штарковских подуровней основного 7F_6 и возбужденного 5D_4 мультиплетов некрамерсовского иона Tb^{3+} комбинирующих в оптическом переходе.

Достоверность результатов исследования заключается в возможности сопоставления экспериментальных данных с данными, полученными с помощью других методов регистрации, а так же 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 оптических и магнитооптических исследований.

Научная и практическая значимость результатов работы заключается в том, что научная ценность полученных результатов определяется тем, что они дают возможность в существенной степени углубить и уточнить существующие представления о структуре энергетического спектра некрамерсовских РЗ – ионов, формирующегося в низкосимметричном кристаллическом окружении; в явной форме выявить взаимосвязь между штарковскими и зеемановскими расщеплениями в энергетических спектрах возбужденных электронных состояний некрамерсовских ионов Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+} с одной стороны и связанных с ними особенностей в оптических, магнитных и магнитооптических свойствах парамагнитных кристаллов со структурой граната и ортоалюмината, активируемых данными РЗ-ионами, с другой.

С практической точки зрения, полученные результаты дают возможность:

- создания различных магнитооптических поляризационных устройств (модуляторов, оптических изоляторов, дисплеев) на основе РЗ-гранатов и РЗ-ортоалюминатов, функционирующих в видимой и ближней УФ-областях спектра.

- применения исследованных РЗ-соединений ($TbAlO_3$, $Ho^{3+}:YGG$ и $Tm^{3+}:YAG$) в качестве активных сред в лазерах видимого диапазона, функционирующих, как в *ир-конверсионной*, так и в традиционной схемах оптической накачки.

Некоторые результаты работы могут быть использованы при проведении занятий по спецкурсам «Магнитооптика и спектроскопия кристаллов», «Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом», а также могут быть включены в спецкурсы для студентов смежных

физических специальностей, таких как лазерная физика, физика магнитных явлений и т.п.

Разработанный в процессе выполнения диссертации фотоупругий поляризационный модулятор с оптической положительной обратной связью был успешно использован при измерении спектров МКД, МЦПЛ и фарадеевского вращения различных $4f$ - и $3d$ -соединений, а также, при исследовании поляризационных свойств маломодовых оптических волокон. Результаты диссертационной работы, касающиеся координатного преобразования волновых функций электронных состояний некрамерсовских РЗ-ионов в КП симметрии D_2 и C_5 активно используются при выполнении совместных научных исследований с учеными США. Некоторые результаты работы также могут быть применены при проведении лабораторных занятий по курсам физической оптики, лазерной физики.

Внедрение результатов исследования. Полученные научные результаты при выполнении диссертационной работы связанные со штарковским и зеемановским расщеплением в энергетических спектрах электронных состояний некрамерсовских ионов Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+} в кристаллических структурах гранатов симметрии C_5 и D_2 были использованы зарубежными исследователями (ссылки в международных журналах: *Journal of Rare Earths*, Volume 33, № 12, 2015, IF: 4.632; *Advanced Optical Materials*, Volume 9, № 24, 2021, IF: 9.599; *Materials Letters*, Volume 65, № 12, 2011, IF: 3.423; *Journal of Rare Earths*, Volume 33, № 12, 2015, IF: 4.632) для идентификации оптических переходов, наблюдаемых в магнитооптических эффектах в редкоземельных ионах.

Результаты исследований эффекта Зеемана на излучательном $4f \rightarrow 4f$ переходе $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ в ионах Tb^{3+} в тербий-иттриевом гранате-алюминате $Tb_{0,2}Y_{2,8}Al_5O_{12}$, демонстрирующие сильное влияние внешнего магнитного поля не только на зеемановские расщепления резонансных частот оптических переходов, но и на интенсивности линий излучения, обусловленных модификацией вероятностей оптических переходов в противоположных световых циркулярных поляризациях были использованы в Федеральном научно-исследовательском центре “Кристаллографии и фотоники” РАН при разработке наблюдения и прецизионных измерений магнитооптических эффектов в кристаллических средах (Письмо № 9311/41-1180 от 2023 йил 22 ноября 2023 года ФНИЦ “Кристаллографии и фотоники” РАН). Полученные результаты позволяли улучшить процессы исследования магнитооптических свойств гранатов галлатов и ортоалюминатов;

Результаты диссертационной работы, полученные при исследовании влияния внешнего магнитного поля на зеемановское расщепление и квантовомеханическое «смешивание» возбужденных электронных состояний РЗ-иона Tb^{3+} и Eu^{3+} в структурах тербий-галлиевого ($TbGG$) и гадолиний-галлиевого (GGG) гранатов были использованы для исследования физических механизмов магнитооптических свойств РЗ-соединений в Уханьском университете (Письмо School of Power and Mechanical Engineering

Wuhan University от 27 ноября 2023 года). Полученные результаты позволили улучшить и дополнить разработанные методики по исследованию механизмов магнитооптических магнитооптических эффектов.

Апробация результатов работы Основные результаты работы были представлены на XXI Международной научной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (Москва, июнь-июль 2009), на Московском международном симпозиуме по магнетизму «Moscow International Symposium on Magnetism - MISM» (Москва, август 2011), Международной научной конференции «Magnetic and Superconducting Materials - MSM» (Хива, сентябрь 2007), на 9-ом Узбекско-Корейском симпозиуме «Nanoscience: Problems and Prospects Quantum Functional Materials and Devices» (Ташкент, ноябрь 2010), на Республиканской научной конференции «Оптические методы в современной физике» (Ташкент, 2008г.), на Республиканской научной конференции «Физика ва физик таълимнинг замонавий муаммолари» (Самарканд, 2009г.), на Научно-практическом семинаре «Лазерная физика, прикладные аспекты оптики и лазерной физики» (Ташкент, декабрь 2006).

Опубликованность результатов Основные результаты диссертации опубликованы в 24 научных публикациях, в том числе, в 11 научных статьях: из них 10 – в рецензируемых зарубежных научных журналах («Journal of Applied Physics», «Journal of Luminescence», «Journal of Rare-Earth», «Physica Status Solidi B», «Оптика и Спектроскопия», «Известия РАН. Сер. Физ.», «Известия Вузов. Физика»), 1 – в республиканском журнале, 13 – в тезисах докладов.

Структура и объем диссертации Диссертационная работа состоит из Введения, 7 глав, Заключения, Приложения и Списка литературы из 155 наименований. Полный объем диссертации составляет 246 страниц текста, включая 50 рисунков и 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введение аргументируются актуальность темы исследования, формируются цели и задачи исследования, характеризуются объект и предмет исследований, 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 «Магнитооптические, оптические и магнитные свойства редкоземельных некрамерсовских ионов в кристаллах парамагнитных гранатов и ортоалюминатов» имеющей обзорный характер, приведены достаточно подробные сведения о кристаллографических, магнитооптических, оптических и магнитных

свойствах редкоземельных некрамерсовских ионов в кристаллах парамагнитных гранатов и ортоалюминатов.

Во второй главе «Экспериментальные установки и методики измерений. Образцы» кратко описаны методики измерений, экспериментальные установки, используемые для проведения оптических, магнитных и магнитооптических исследований.

Монокристаллы тербий-иттриевого $Tb_{0,2}Y_{2,8}Al_5O_{12}$ (TbYAG) и туллий – иттриевого $Tm_{0,2}Y_{2,8}Al_5O_{12}$ (TmYAG) граната-алюмината, гольмий-иттриевого $Ho_{0,2}Y_{2,8}Ga_5O_{12}$ (HoYGG) итербиевого граната-галлата $Tb_3Ga_5O_{12}$ (TbGG), а также гадолиниевого $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) граната-галлата с ионами Eu^{3+} и тербиевого ортоалюмината $TbAlO_3$, на которых проводились экспериментальные исследования, были выращены методом спонтанной кристаллизации из “раствора в расплаве”.

В третьей главе «Магнитооптические и оптические спектры редкоземельных некрамерсовских ионов (Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+}) в кристаллах парамагнитных гранатов» приведены результаты исследований магнитооптических и оптических спектров редкоземельных некрамерсовских ионов (Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+}) в кристаллах парамагнитных гранатов. Спектры поглощения граната-галлата $Ho^{3+}:YGG$ ($Ho_{0,2}Y_{2,8}Ga_5O_{12}$), измеренные на полосах поглощения $^5I_8 \rightarrow ^5S_2$, 5F_4 и $^5I_8 \rightarrow ^5F_5$ приведены на рис.1. Понижение температуры до 8К приводит как к расщеплению некоторых линий на несколько компонент, так и к одновременному сдвигу их максимумов.

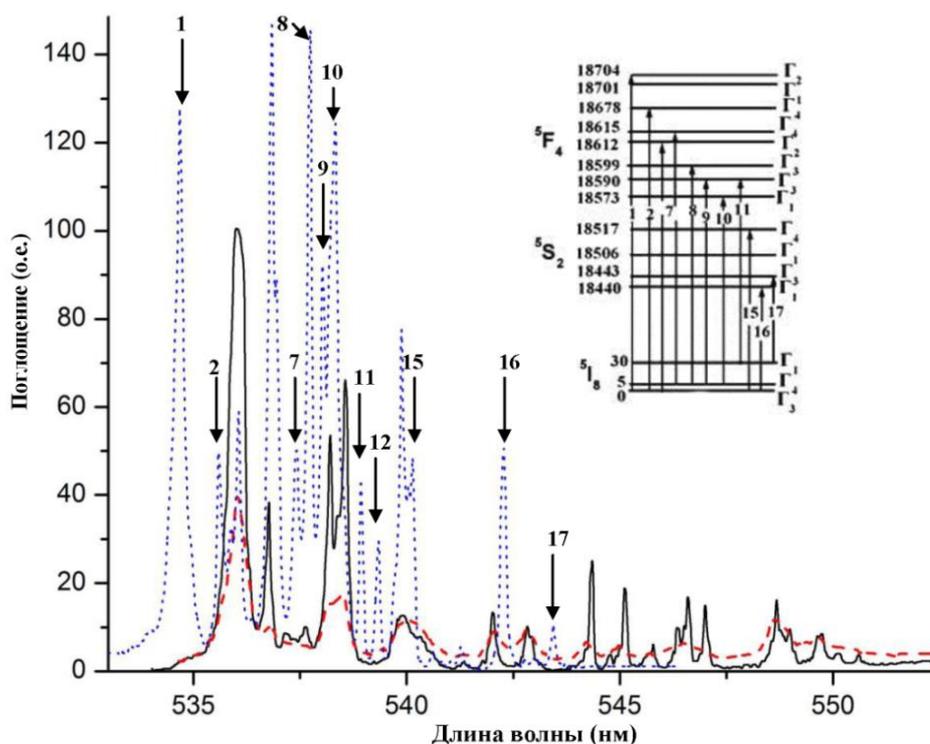


Рис.1. Спектры поглощения граната-галлата $Ho^{3+}:YGG$, измеренные при $T=8K$ (точки), $85K$ (сплошная линия) и $293K$ (пунктир). Максимальная величина поглощения при $T=8K$ составляет $\sim 27\text{см}^{-1}$. На вставке: схема оптических переходов между подуровнями 5S_2 , 5F_4 и 5I_8 мультиплетов иона Ho^{3+} в галлате-гранате.

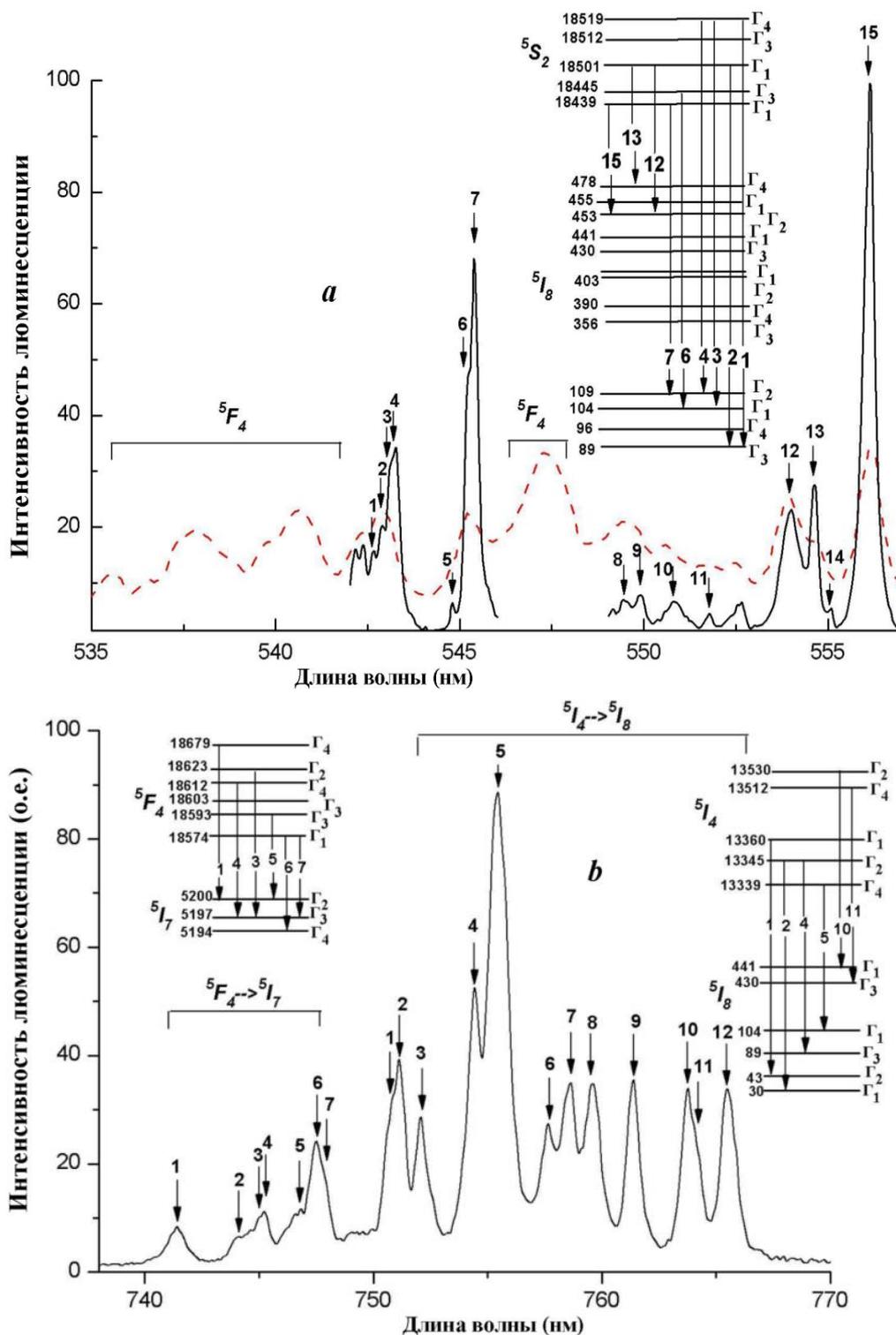


Рис.2. Спектры «зеленой» полосы люминесценции в $\text{Ho}^{3+}:\text{YGG}$, записанные при $T=80\text{K}$ (сплошная линия) и 293K (пунктир) - (а); спектры инфракрасных полос люминесценции измеренные при $T=293\text{K}$ - (б). На вставках: схемы оптических излучательных переходов $5F_4 \rightarrow 5I_7$, $5I_4 \rightarrow 5I_8$ и $5S_2 \rightarrow 5I_8$.

Спектры люминесценции (рис.2) на излучательных $4f \rightarrow 4f$ переходах $5F_4 \rightarrow 5I_7$, $5I_4 \rightarrow 5I_8$ и $5S_2 \rightarrow 5I_8$ в $\text{Ho}^{3+}:\text{YGG}$ обусловлены фотовозбуждением высокоэнергетических мультиплетов $3H_4$, $5G_4$, $5G_5$ и $5G_6$ основной $4f^{10}$ -конфигурации РЗ-иона Ho^{3+} .

Для "зеленой" полосы люминесценции, уменьшение температуры образца от 293 до 80К сопровождается "вымораживанием" линий излучения, лежащих в спектральном диапазоне от 546 до 555нм (переходы из возбужденных состояний составного мультиплета ($^5S_2+^5F_4$)) и возрастанием интенсивности линий люминесценции 1 -7 и 8 -15 (переходы со штарковских подуровней мультиплета 5S_2) наряду с одновременным сужением этих линий.

Спектр МКД гольмий-иттрий галлиевого граната записанный во внешнем магнитном поле $H=4,0$ кЭ при $T=80$ К в полосе поглощения $^5I_8 \rightarrow ^5G_5$ представлен на **рис.3**. Из сопоставления спектров МКД и оптического поглощения хорошо видно, что вклад «парамагнитного» C' -члена проявляется в небольшой асимметрии спектральной зависимости МКД, которую мы и наблюдаем в опыте на линии поглощения 6, а также на линии 4. A' -член МКД проявляется вблизи линии поглощения -1,-2 и -3.

На **рис.4** приведен спектр степени МЦПЛ ионов Eu^{3+} в GGG, измеренный на линии люминесценции $^5D_1 \rightarrow ^7F_1$ при $T=300$ К во внешнем магнитном поле $H = 9,0$ кЭ. На линии излучения -4 спектральная зависимость $P(\nu)$ представляет собой наклонную линейную зависимость в пределах линии люминесценции со сменой знака эффекта в ее центре (A член степени МЦПЛ), в то время как на трех других линиях вторичного свечения МЦПЛ отсутствует.

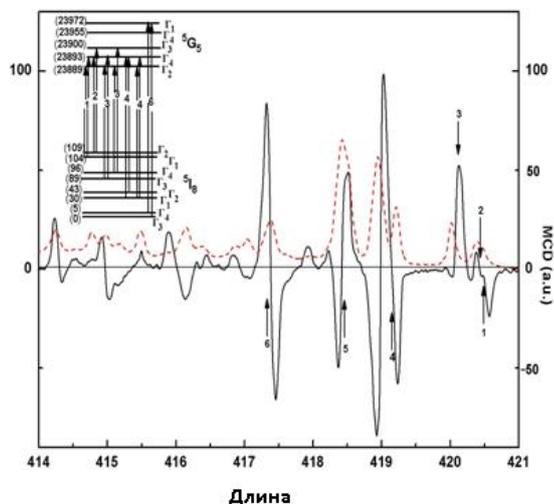


Рис.3. Спектры МКД (сплошная линия) и оптического поглощения (пунктир) в $Ho^{3+}:YGG$, записанные при $T=80$ К. Характерные особенности полосы поглощения $^5I_8 \rightarrow ^5G_5$ и спектра МКД обозначены пронумерованными вертикальными стрелками. На вставке: схема магнитооптических активных переходов между штарковскими подуровнями мультиплетов 5I_8 и 5G_5 .

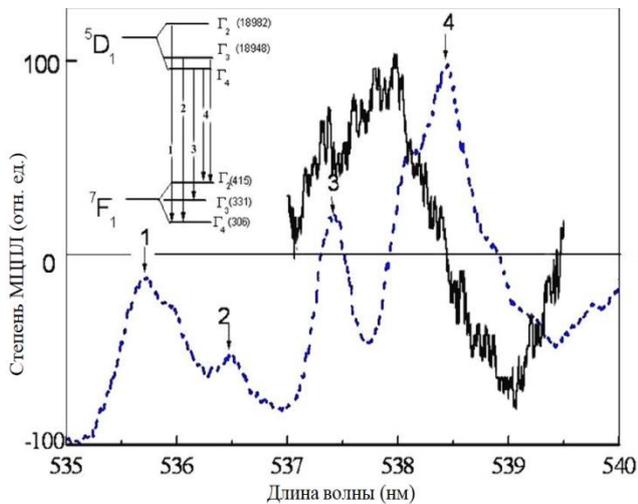


Рис.4. Спектры люминесценции (пунктир) и степени МЦПЛ, записанные при $T = 300$ К на полосе флуоресценции $^5D_1 \rightarrow ^7F_1$ ионов Eu^{3+} в GGG. Спектр степени МЦПЛ во внешнем магнитном поле $H = 9,0$ кЭ. Вставка: схема магнитооптических активных излучающих переходов между штарковскими подуровнями 5D_1 и 7F_1 мультиплетов.

A - член степени МЦПЛ обусловлен зеемановским расщеплением квазидублетного состояния мультиплета 5D_1 в магнитооптически-активном переходе «квазидублет \rightarrow изолированный синглет». Кроме того, подобный

выбор симметрии подуровней квазидублета в мультиплете 5D_1 , однозначно объясняет отсутствие МЦПЛ на трех других флуоресцентных линиях -1,-2,-3 обусловленных переходами с подуровней с этого же квазидублета, так в этом случае симметрия комбинирующих состояний не удовлетворяет правилам отбора для A - члена степени МЦПЛ.

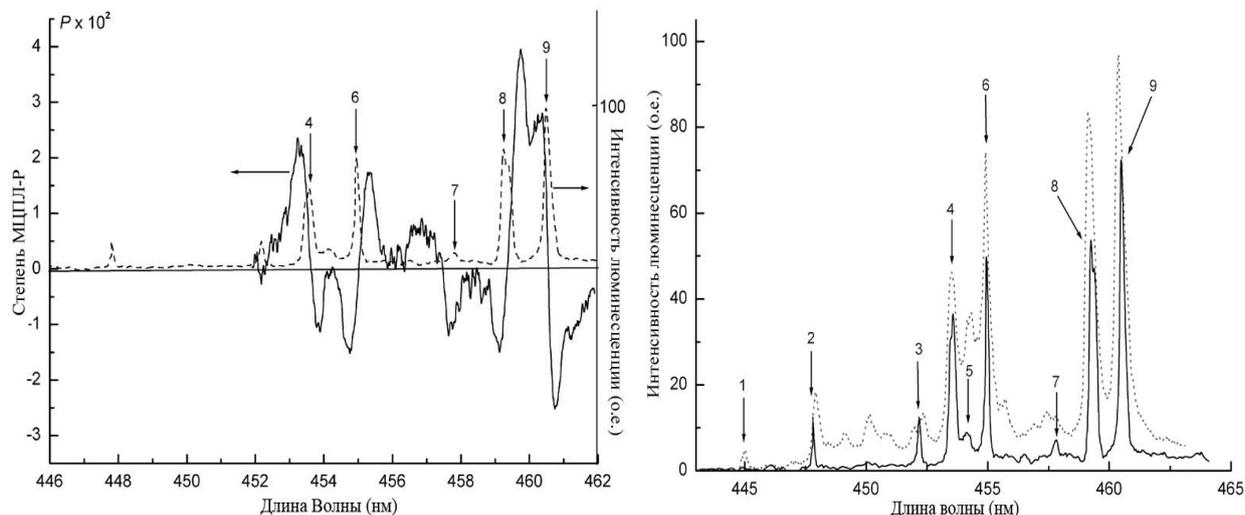


Рис.5. Спектр степени МЦПЛ (а), записанный в полосе излучения ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_4$ в $Tm^{3+}:YAG$ при $T = 293K$, во внешнем магнитном поле $H = 9.5$ кЭ. Для большей наглядности там же приводится фрагмент спектра люминесценции данного граната при $T = 78K$ (пунктир). В нижней части рисунка (b) даны спектры соответствующей полосы излучения, записанные при температурах $T = 78K$ (сплошная линия) и $293K$ (точки).

Использование правил отбора (по симметрии) для матричных элементов операторов компонент магнитного и электрического дипольных моментов в A' -члене и C' МКД дает возможность непосредственного определения симметрии комбинирующих состояний в оптических переходах.

Сопоставление энергий наблюдаемых в эксперименте линий излучения - 1, - 2, ... - 9 с теоретической схемой энергетических уровней основной $4f^{(12)}$ -конфигурации РЗ-ионов Tm^{3+} в кристаллическом поле (КП) симметрии D_2 позволяет провести симметричную идентификацию излучательных $4f \rightarrow 4f$ переходов в полосе люминесценции ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_4$ (рис.4). Спектральные зависимости степени МЦПЛ на линиях излучения -6 и -9 в полосе люминесценции ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_4$ имеют обычную для «диамагнитного» A' - члена МЦПЛ симметричную форму (со сменой знака эффекта в центре линии. Особенности магнитополяризованной люминесценции на линиях излучения - 4 и - 8 связаны с парамагнитным членом (C -член) и формируются главным образом механизмом Ван-Флековского «смешивания» данного квазидублетного состояния с состояниями близлежащих штарковских синглетов в мультиплете 1D_2 .

В четвертой главе «Эффект Зеемана и особенности штарковского расщепления электронных состояний редкоземельного иона в тербий-иттрий алюминиевом гранате TbYAG» приведены результаты

исследований эффекта Зеемана в спектрах люминесценции тербий-иттрий алюминиевого граната (TbYAG).

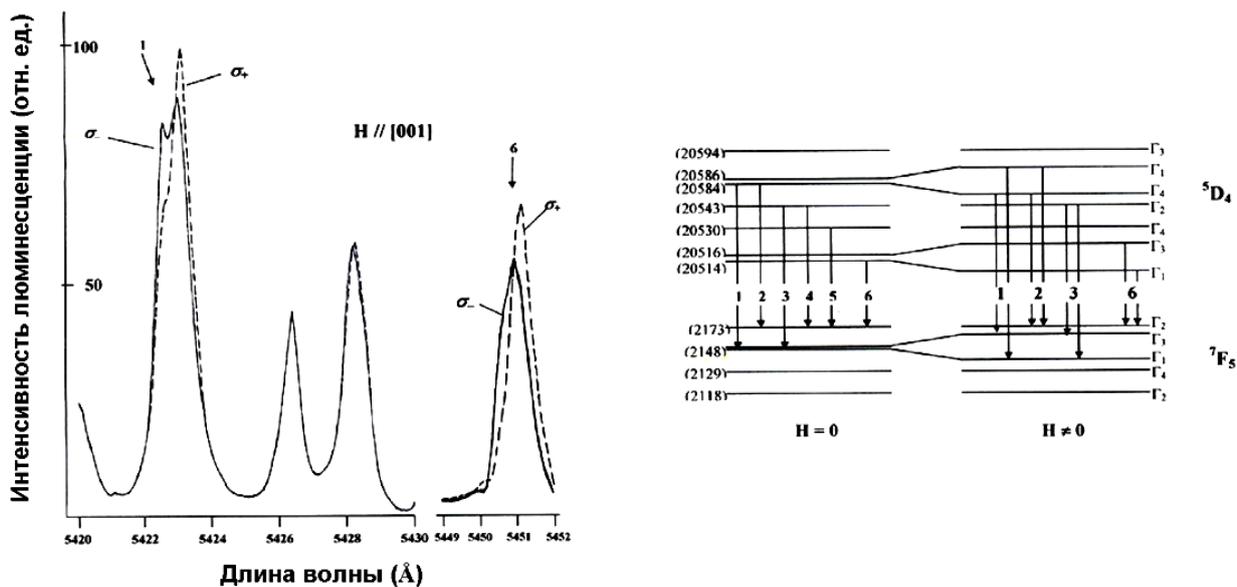


Рис.6. σ и σ_+ - спектры линий излучения -1 и -6 при ориентации внешнего магнитного поля $H=7\text{кОе}$ параллельно оси $[001]$ при $T=85\text{К}$. Справа – схема магнитооптически-активных переходов, реализующихся в продольной зеемановской геометрии эксперимента. В скобках приведены энергии штарковских подуровней мультиплетов 5D_4 и 7F_5 в см^{-1} .

Измерения спектральных зависимостей эффекта Зеемана в «зеленой» полосе люминесценции, обусловленной излучательным $4f \rightarrow 4f$ переходом $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ в ионах Tb^{3+} в гранате TbYAG ($\text{Tb}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Al}_5\text{O}_{12}$) были проведены при температуре $T=85\text{К}$ во внешнем магнитном поле H напряженностью до 7кОе .

На **рис.6** показаны спектральные зависимости эффекта Зеемана линий излучения -1 и -6 , записанные в правой σ_+ и левой σ_- циркулярных поляризациях при ориентации внешнего поля вдоль кристаллографического направления $[001]$. Линии -1 и -6 излучения испытывают незначительное зеемановское расщепление во внешнем поле, а также относительные изменения интенсивности в противоположных циркулярных поляризациях. Вследствие резкого различия энергетических интервалов между компонентами дублета в ортогональных циркулярных поляризациях σ_+ и σ_- (при неизменном направлении внешнего поля $H \approx 7\text{кОе}$), линия 1 практически не разрешается в одной из них. Индуцированное внешним магнитным полем H изменение интенсивностей линий люминесценции в ортогональных циркулярных поляризациях обусловлено «смешиванием» волновых функций близлежащих штарковских синглетов, с которых происходят магнитооптически активные переходы в PЗ-ионах.

В пятой главе «Особенности магнитооптических спектров тербий-галлиевого граната TbGG» приведены спектры МКД, МЦПЛ и оптического поглощения парамагнитного граната TbGG на $4f \rightarrow 4f$ переходе в видимой области спектра при температурах $T=80\text{К}$ и 300К .

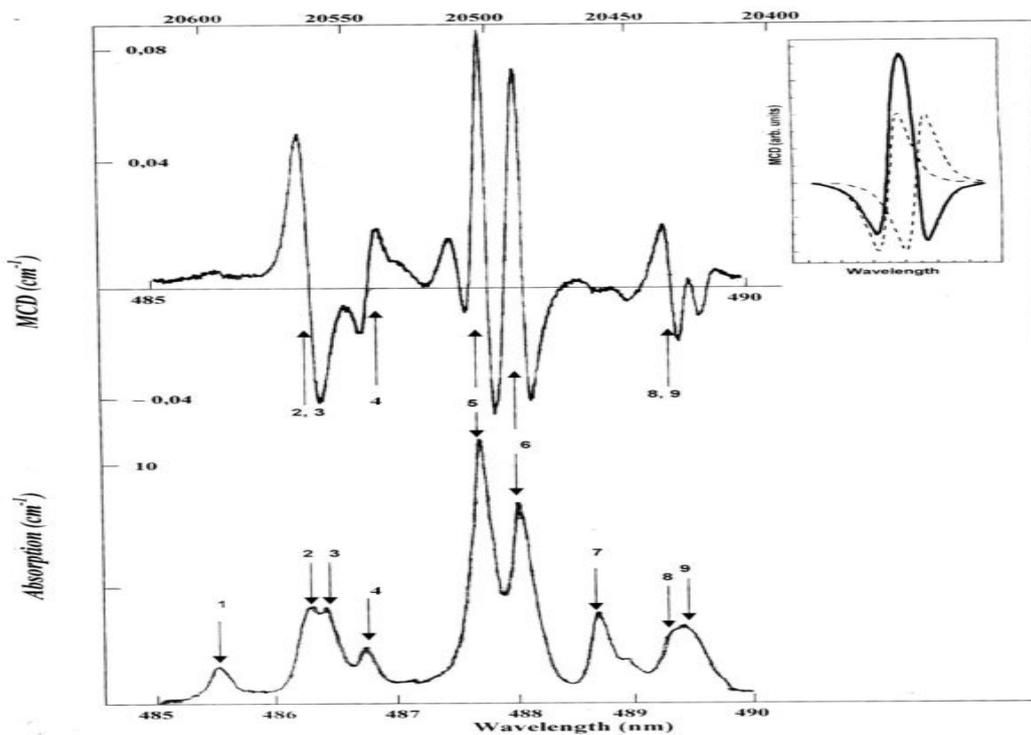


Рис.7. В верхней части рисунка приводится спектр МКД, записанный при $T=80\text{K}$ на полосе поглощения ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$ в TbGG, во внешнем магнитном поле $H=5\text{kOe}$, параллельном кристаллографическому направлению $[011]$ кристалла. На вставке: приведены результаты моделирования особенности спектра МКД на линии излучения б разностью (сплошная линия) двух одинаковых S – образных кривых (пунктир), сдвинутых относительно друг друга на $\sim 2,5 \div 3,0 \text{ cm}^{-1}$.

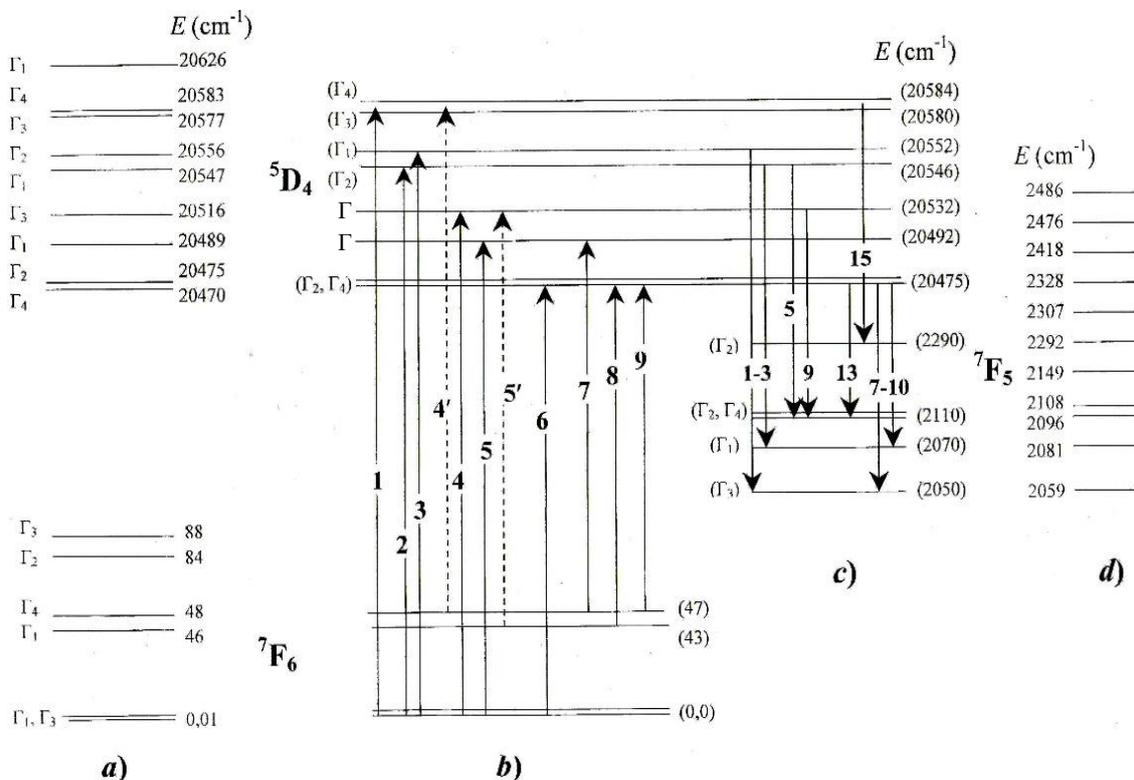


Рис.8. Схемы оптических переходов между компонентами штарковского расщепления энергетических спектров 5D_4 , 7F_5 и 7F_6 мультиплетов РЗ-иона Tb^{3+} в TbGG (a, b, c, d)

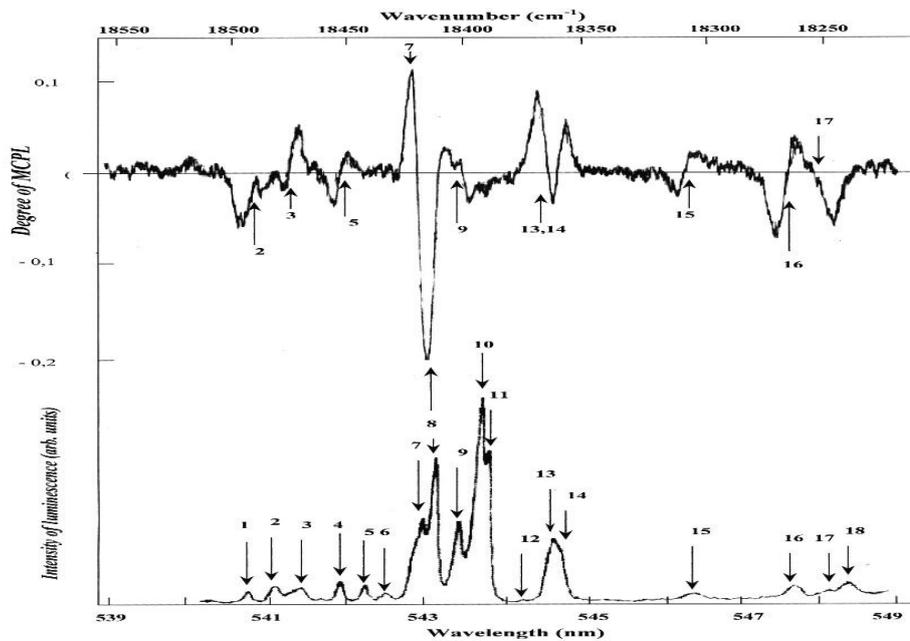


Рис.9. Верхней части рисунка приводится спектр степени МЦПЛ, записанный на полосе излучения ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ в TbGG при $T=80K$, во внешнем магнитном поле $H=7kOe$, параллельном кристаллографическому направлению кристалла [110].

Результаты идентификации оптических $4f \rightarrow 4f$ переходов с наблюдаемыми линиями на полосе поглощения ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$, проведенной на основе полученных нами экспериментальных данных, а также, результатов численных вычислений энергий штарковских подуровней и волновых функций 7F_5 и 5D_4 мультиплетов иона Tb^{3+} в TbGG показаны на **рис.8**.

Спектр степени МЦПЛ тербий-галлиевого граната, записанный при $T = 80K$ на излучательном переходе ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$, показан в верхней части рис.9. Анализ спектров МКД и МЦПЛ тербий-галлиевого граната (рис.7 и 9) показал, что C' -член МОА проявляется в небольшой асимметрии результирующей спектральной зависимости МКД, которую мы и наблюдаем в опыте на линиях поглощения -2, -3 и -4. На остальных линиях проявляется A член МОА. Возникновение A' -членов степени МЦПЛ на линиях излучения -9, -13 и -14, обусловлено наличием квазидублета (G_2, G_4) в спектре мультиплета 7F_5 при энергии $\sim 2110 \text{ см}^{-1}$. Экспериментально обнаружено на линиях люминесценции -7, -8, -10, -11 и -15 отсутствие A' -члена степени МЦПЛ, обусловленного зеемановским расщеплением подуровней квазидублетов (G_2, G_4) и (G_3, G_4) мультиплета 5D_4 .

В шестой главе «Природа эффекта Фарадея некрамерсовских редкоземельных ионов в ортоалюминатах» приведены результаты идентификации оптических переходов в спектрах поглощения и люминесценции РЗ-ортоалюмината $TbAlO_3$, а также результаты анализа температурной зависимости обратной магнитной восприимчивости $TbAlO_3$ измеренной вдоль кристаллографического направления [110].

Из приведенного на **рис.10**. графика хорошо видно, что температурная зависимость величины $\chi_{[110]}^{-1}$ с возрастанием температуры T нелинейно изменяется с температурой. Подобное поведение магнитных свойств РЗ-ортоалюмината тербия вдоль оси [110] может быть объяснено значительным

вкладом в результирующий магнитный момент РЗ-подрешетки механизма «примешивания» внешним полем H волновых функций возбужденных штарковских подуровней мультиплета 7F_6 к волновым функциям основного квазидублета того же мультиплета. На вставке к рис. 9. показано схематически (с помощью стрелок) Ван-Флековское смешивание состояний 9 нижних штарковских подуровней основного мультиплета 7F_6 иона Tb^{3+} в $TbAlO_3$.

Для вычисления молярной магнитной восприимчивости $\chi_{[110]}^{(m)}$ $TbAlO_3$ в ab -плоскости ромбического кристалла было использовано хорошо известное выражение для магнитной восприимчивости χ_{VV} имеющей Ван-Флековское происхождение.

$$\chi_{[110]}^{(m)} = \frac{1}{2}(\chi_a^{(m)} + \chi_b^{(m)}) = \frac{1}{2}(\chi'^{(m)} + 2\Delta\chi_{V-V}^{(m)}) = g_0^2 \mu_B^2 N_A \left\{ \sum_{n \neq m} \left[\rho_n \frac{| \langle n | \hat{J}_z | m \rangle |^2}{E_m - E_n} \right] + 2 \sum_{i \neq k} \left[\frac{| \langle i | \hat{J}_x | k \rangle |^2}{E_i - E_k} \rho_k \right] \right\} \quad (1)$$

$$\chi_a^{(m)} = (\chi'^{(m)} \cos^2 \alpha_0 + \Delta\chi_{V-V}^{(m)}) \quad (2)$$

$$\chi_b^{(m)} = (\chi'^{(m)} \sin^2 \alpha_0 + \Delta\chi_{V-V}^{(m)}) \quad (3)$$

где, g_0 – фактор Ланде основного мультиплета РЗ-иона (для иона Tb^{3+} , $g_0 = 1.5$); μ_B – магнетон Бора; N_A – число Авогадро; $n \neq m$; $|n\rangle, |m\rangle$ и $|i\rangle, |k\rangle$ – вещественные волновые функции «смешиваемых» внешним полем состояний невырожденных штарковских синглетов; E_n, E_m – их энергии; ρ_i – бoльцмановские населенности уровней.

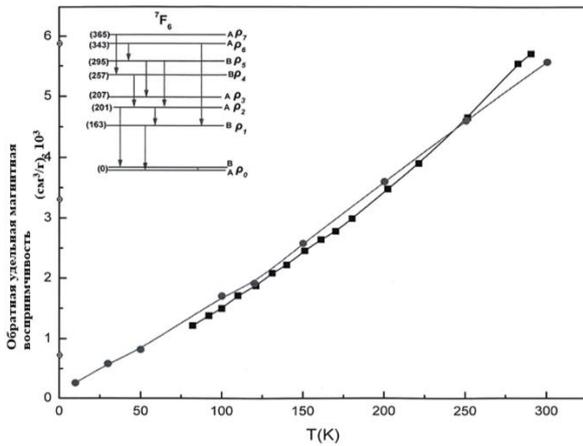


Рис.10. Температурная зависимость обратной удельной магнитной восприимчивости $\chi_{[110]}$ $TbAlO_3$ [101]: (•••) – результаты вычислений по формуле (1-3); (черные квадратики) – результаты измерений. На вставке: схема Ван-Флековского «смешивания» внешним магнитным полем состояний 9 нижних штарковских синглетов основного мультиплета 7F_6 иона Tb^{3+} в $TbAlO_3$ в заданной геометрии намагничивания ромбического кристалла.

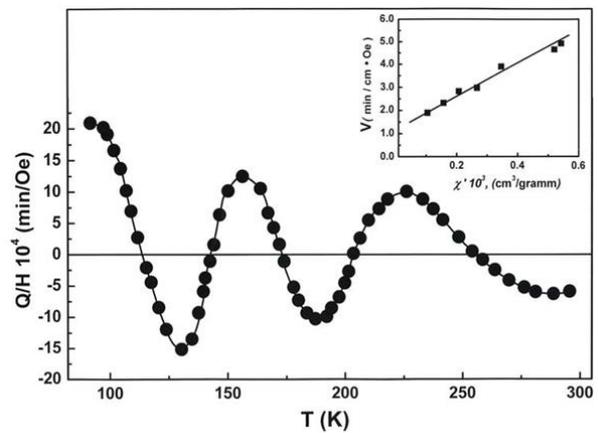


Рис. 11. Температурная зависимость угла поворота большой оси эллипса поляризации θ , измеренной вдоль оси [110] ромбического кристалла $TbAlO_3$ на длине волны $\lambda = 506$ нм [101]. На вставке: зависимость постоянной Верде V измеренной вдоль оси [110] ромбического кристалла $TbAlO_3$ на длине волны $\lambda = 506$ нм от продольной магнитной восприимчивости.

В формуле (1), слагаемое $\chi'^{(m)}$ – вклад в магнитную восприимчивость РЗ-ортоалюмината, обусловленный различием в бoльцмановских населенностях штарковских подуровней мультиплета 7F_6 (т.н. продольная восприимчивость). Второе слагаемое в этой формуле, $\Delta\chi_{V-V}^{(m)}$ – Ван-Флековский вклад в восприимчивость, имеющий изотропный характер.

Из **рис.10.** хорошо видно, что в интервале температур $80\div 300\text{K}$, результаты измерений хорошо согласуются с расчетными данными, что и служит дополнительным подтверждением корректности выполненной теоретико-групповой идентификации симметрии волновых функций 9 нижних штарковских подуровней основного мультиплета 7F_6 в структуре ортоалюмината.

Анализ эффекта Фарадея показал, что поведение постоянной Верде V не коррелирует с поведением магнитной восприимчивости $\chi_{[110]}^{(m)}$ ромбического кристалла TbAlO_3 при понижении температуры, а полностью определяется ее т.н. продольной, т.е. температурно-зависящей составляющей $\chi'^{(m)}$. Это хорошо видно из вставки к **рис.11**, где приведена линейная (в пределах ошибки эксперимента $\sim 5\%$) зависимость постоянной Верде V от величины $\chi'^{(m)}$ для длины волны $\lambda=506\text{нм}$.

На основе теоретико-групповых соображений, в диссертации предложено объяснение подобного поведения температурной зависимости постоянной Верде $V_{[110]}$, характеризующейся практически полным отсутствием вклада Ван-Флековского механизма «смешивания» в фарадеевское вращение TbAlO_3 , измеренного вдоль оси $[110]$ ромбического кристалла.

В седьмой главе “Особенности оптических спектров некрамерсовских РЗ-ионов Ho^{3+} и Tb^{3+} в кристаллическом поле низкой симметрии” приведены спектры поглощения ортоалюмината TbAlO_3 , записанные в линейно-поляризованном свете ($\vec{E}\parallel c$ и $\vec{E}\perp c$ - оси, где \vec{E} - электрический вектор световой волны) в полосе ${}^7F_6\rightarrow{}^5D_4$ при $T=78\text{K}$ и 300K и результаты вычислений экспериментально определенных относительных интенсивностей линий люминесценции (флуоресценции) гольмий-иттриевого граната-галлата $\text{YGG}:\text{Ho}^{3+}$.

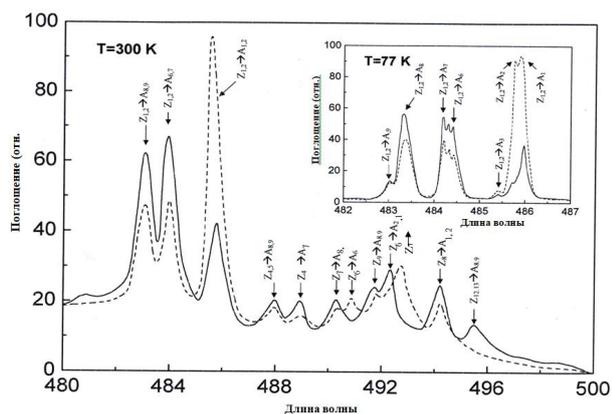


Рис.12. Спектры поглощения РЗ-ортоалюмината TbAlO_3 , записанные при $T=300\text{K}$ на переходе ${}^7F_6\rightarrow{}^5D_4$ в двух ортогональных линейных световых поляризациях: $\vec{E}\parallel c$ -оси (сплошные линии) и $\vec{E}\perp c$ - оси ромбического кристалла (пунктир). На вставке: записи поляризационных спектров поглощения при $T=78\text{K}$.

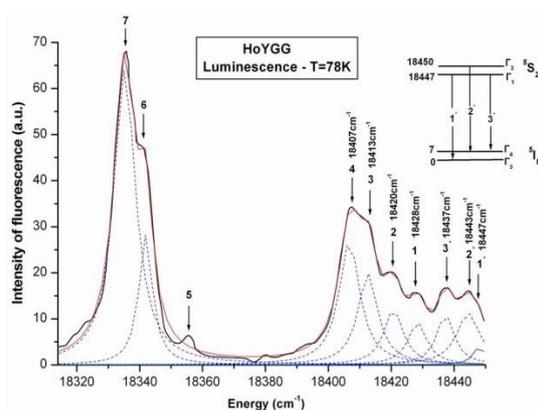


Рис.13. Разложение измеренного спектра люминесценции $\text{YGG}:\text{Ho}^{3+}$ при $T=78\text{K}$ на Гауссовские составляющие.

Результаты симметричной идентификации оптических переходов, наблюдаемых в полосе поглощения ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$ при $T=300K$ (рис.11) и результаты численных вычислений энергетического спектра мультиплетов 7F_6 и 5D_4 в КП симметрии C_5 показывают, что переходы происходят между штарковскими синглетами различной симметрии (т. е. между $A \rightarrow B$, или $B \rightarrow A$ синглетами) комбинирующих мультиплетов. В то же время линия поглощения, лежащая вблизи длины волны $\sim 496nm$ обусловлена переходом между возбужденными состояниями (квазидублетами) мультиплетов 7F_6 и 5D_4 , сформированных из штарковских синглетов одинаковой симметрии, что и объясняет резкую анизотропию данной линии в поляризованном свете.

Спектр люминесценции граната $YGG:Ho^{3+}$, записанный на излучательном переходе ${}^5S_2 \rightarrow {}^5I_8$ при $T=78K$ приведен на **рис.13**. На данном рисунке показано разложение спектра люминесценции на элементарные гауссовские составляющие. Оценка величин отношений площадей соответствующих линий поглощения $-2'$, -7 , -12 и -15 показывает, что: $\langle S_7 \rangle / \langle S_2 \rangle \sim 8 \div 10$ и $\langle S_{15} \rangle / \langle S_{12} \rangle \sim 1,3 \div 1,7$.

С другой стороны, используя волновые функции штарковских подуровней мультиплетов 5S_2 и 5I_8 иона Ho^{3+} в YGG можно также найти матричные элементы вышеуказанных оптических излучательных $4f \rightarrow 4f$ переходов в приближении “слабого” КП симметрии D_2 . Соответствующие вычисления «сил переходов» с использованием больцмановских заселенностей ρ_i ($i=1,2,..5$) штарковских подуровней 5S_2 мультиплета, комбинирующих в рассмотренных выше излучательных переходах, показывают неплохое соответствие теоретически вычисленных и найденных экспериментально интенсивностей линий люминесценции, так как экспериментально найденные величины отношений интенсивностей линий люминесценции -7 , $-2'$ и -15 , -12 , соответственно, достаточно близки к теоретически вычисленным по порядку величины:

$$\frac{|\langle \psi_{77} / D_Z^{(1)} / \psi_8 \rangle|^2 \cdot \rho_1}{|\langle \psi_{78} / D_Z^{(1)} / \psi_2 \rangle|^2 \cdot \rho_2} = 8,1 \text{ и } \frac{|\langle \psi_{77} / D_Z^{(1)} / \psi_{15} \rangle|^2 \cdot \rho_1}{|\langle \psi_{79} / D_Z^{(1)} / \psi_2 \rangle|^2 \cdot \rho_3} = 1,74$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных научных исследований, на тему: «Магнитооптическая и оптическая спектроскопия редкоземельных некрамерсовских ионов в кристаллах парамагнитных гранатов и ортоалюминатов» были получены следующие результаты:

1. Впервые в данной работе найдены энергии штарковских подуровней мультиплетов основной $4f^{(n)}$ конфигурации в гольмий-иттриевом гранате-галлате $HoYGG$ и в гадолиний-галлиевом гранате GGG с ионами Eu^{3+} . Выполнена идентификация оптических переходов происходящих между мультиплетами на основе анализа спектральных зависимостей магнитооптических (МЦПЛ, МКД) и оптических (поглощение,

люминесценция) эффектов. Установлено также, что значительная величина МОА некрамерсовского РЗ-иона Ho^{3+} в гранате-галлате, обнаруженная при низких температурах на излучательном переходе $^5\text{S}_2 \rightarrow ^5\text{I}_8$ однозначно связана с наличием «квазидублетных» (т.е. «квазивырожденных») состояний в энергетических спектрах мультиплетов $^5\text{S}_2$ и $^5\text{I}_8$.

2. Определены энергии штарковских подуровней мультиплетов основной $4f^{(n)}$ конфигурации в тулий-иттриевом гранате-алюминате TmYAG и выполнена идентификация оптических переходов происходящих между ними на основе анализа спектральных зависимостей магнитооптических (МЦПЛ, МКД) и оптических (поглощение, люминесценция) эффектов, наблюдаемых при низких температурах. Показано, что в магнитооптике излучательных $4f \rightarrow 4f$ переходов в тулиевом гранате-алюминате $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$ доминирует механизм «смешивания» внешним полем H возбужденных электронных состояний некрамерсовского РЗ-иона.

3. Впервые исследованы и интерпретированы спектры магнитного кругового дихроизма (МКД) на полосе поглощения $^7\text{F}_6 \rightarrow ^5\text{D}_4$, а также, спектры магнитной циркулярной поляризации люминесценции (МЦПЛ) на полосе люминесценции $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_5$ в тербий-галлиевом и в тербий-иттрий галлиевом гранатах при температурах 80 и 300К.

4. Из анализа спектральных зависимостей магнитооптических и оптических спектров выполнена идентификация оптических переходов происходящих между штарковскими подуровнями мультиплетов $^7\text{F}_6$, $^7\text{F}_5$ и $^5\text{D}_4$ в TbGaG . Показано, что найденные экспериментально индексы симметрии волновых функций и энергии штарковских подуровней данных мультиплетов подтверждают результаты численных вычислений энергетического спектра редкоземельного иона Tb^{3+} в тербиевом галлате-гранате.

5. Впервые обнаружено различие температурных зависимостей постоянной Верде V и магнитной восприимчивости χ , измеренных вдоль кристаллографического направления $[110]$ ромбического кристалла TbAlO_3 в интервале температур $85 \div 300\text{K}$. Наблюдаемый эффект объяснен отсутствием вклада Ван-Флековского механизма «смешивания» электронных состояний иона Tb^{3+} в TbAlO_3 в фарадеевское вращение, обусловленного определенным характером симметрии волновых функций нижайших штарковских подуровней $^7\text{F}_6$ мультиплета основной $4f^{(8)}$ -конфигурации и комбинирующих с ними в магнитооптически-активном $4f \rightarrow 5d$ переходе штарковских подуровней $^7\text{D}_5$ мультиплета смешанной возбужденной $4f^{(7)}5d$ - конфигурации иона Tb^{3+} в КП симметрии C_S .

6. Показано что обнаруженная в данной работе сильная анизотропия спектра поглощения (в линейно-поляризованном свете) РЗ-ортоалюмината TbAlO_3 , на $4f \rightarrow 4f$ переходе $^7\text{F}_6 \rightarrow ^5\text{D}_4$, при температуре $T=78\text{K}$ обусловлена, как определенным характером симметрии волновых функций нижайших штарковских подуровней основного $^7\text{F}_6$ и возбужденного $^5\text{D}_4$ мультиплетов

иона Tb^{3+} комбинирующих в оптическом переходе, так и квазидублетным характером основного состояния некрамерсовского иона Tb^{3+} в КП симметрии C_5 . Его наличие в спектре мультиплета 7F_6 также подтверждено результатами численных расчетов энергетического спектра, выполненных в рамках теории КП симметрии C_5 .

7. Были численно рассчитаны и экспериментально найдены относительные интенсивности линий люминесценции (флуоресценции) в гольмий-иттриевом гранате галлате $YGG:Ho^{3+}$ на излучательном переходе $^5S_2 \rightarrow ^5I_8$.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD OF THE SCIENTIFIC DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 SAMARKAND
STATE UNIVERSITY NAMED AFTER SHAROF RASHIDOV**

**NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN NAMED AFTER MIRZO
ULUGBEK**

RAKHIMOV SHAROF AMONOVICH

**MAGNETO-OPTICAL AND OPTICAL SPECTROSCOPY OF RARE-
EARTH NON-KRAMERS IONS IN CRYSTALS OF PARAMAGNETIC
GARNETS AND ORTHOALUMINATES**

04.01.09 - Physics of magnetic phenomena

**abstract of doctoral dissertation
(DSc) in physical and mathematical sciences**

Samarkand-2024

The theme of the dissertation for a Doctor of Science (DSc) in Physics and Mathematics was registered with the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under № B.2024.1.DSc/FM174.

The dissertation has been completed at the National University of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of the Scientific Council (www.samdu.uz) and on the "Ziyonet" Information and Educational portal website (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor: **Valiev Uygun Vakhidovich**
Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor

Official opponents: **Mukimov Kamil Mukimovich**
Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Sharipov Mirzo Zokirovich
Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor

Eshchanov Bahodir Khudayberganovich
Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor

Lead organization: **Tashkent State Technical University named after Islam Karimov**

Dissertation defense will be held on « 18 » 05 2024 at 12⁰⁰ at the meeting of Scientific Council number PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 at Samarkand State University named after Sh.Rashidov. (Address: University Boulevard 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, Ph.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; fax: (99866) 239-11-40; e-mail: rektor@samdu.uz. cabinet 114, ground floor, the Engineering Physics Institute, Samarkand State University named after Sh.Rashidov).

Dissertation is possible to review in Information Resource Centre at Samarkand State University named after Sh.Rashidov (is registered № 28) (Address: University Boulevard 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, Ph.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; fax: (99866) 239-11-40.

Abstract of dissertation sent out on « 02 » 05 2024 year
(Mailing report № 31 on « 04 » 05 2024 year)



M.Kh. Ashurov
Chairman of the Scientific Council awarding academic degrees, Doctor of Science in Physics and Mathematics, professor, Academician

R.M. Rajabov
Scientific Secretary of the Scientific Council awarding academic degrees, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor

O. Kuvandikov
Chairman of the scientific seminar at the Scientific Council for Awarding Academic Degrees, DSc, Professor

INTRODUCTION (abstract of doctoral (DSc) dissertation)

The aim of the research work is to conduct experimental and theoretical studies of the features of the magnetic, optical and magneto-optical properties of non-kramers rare-earth ions Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+} in garnet and orthoaluminate crystals, due to the nontrivial nature of the Stark splitting of their energy spectra, which are formed in a low-symmetry crystal field (CF) of D_2 and C_5 symmetry, characteristic of the crystalline environment of RE ions in these paramagnetic compounds.

The object and subject of research work. The objects of research were monocrystals of terbium orthoaluminate $TbAlO_3$, terbium-yttrium garnet-aluminate $Tb_{0.2}Y_{2.8}Al_5O_{12}$ (TbYAG), thulium-yttrium garnet-aluminate $Tm_xY_{3-x}Al_5O_{12}$, holmium-yttrium garnet-gallate $Ho_{0.2}Y_{2.8}Ga_5O_{12}$ (HoYGG), as well as terbium, $Tb_3Ga_5O_{12}$ (TbGG) and gadolinium $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) gallate garnets.

The subject of the study is the optical, magnetic, and magneto-optical properties of these rare-earth (RE) compounds, which are studied in wide ranges of temperatures, wavelengths, and magnetic fields.

The scientific novelty of the research work lies in the fact that for the first time the dominant contribution of the effect of quantum mechanical "mixing" of the wave functions of the electronic states of magnetically active ions to the spectral and temperature dependences of magneto-optical effects in the observed crystals of garnets and orthoaluminates activated by non-Kramer RE ions Tb^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Tm^{3+} was demonstrated. This statement is based on the following original experimental results obtained in the framework of this dissertation work:

- The performed symmetry analysis and allowance for the "mixing" effect made it possible to relate the anomalous behavior of the Zeeman splitting of lines in the ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$ absorption band in terbium gallium garnet with $4f \rightarrow 4f$ optical transitions between the Stark sublevels of the 7F_6 and 5D_4 multiplets of the Tb^{3+} ion in TbGG, for which the field dependences of the splitting differ fundamentally from the well-known field dependences of the Zeeman splitting on most absorption lines between the Stark sublevels of the same multiplets, both in terbium gallate garnet and in terbium aluminate garnet TbAG in a longitudinal magnetic field.

- It is shown that the discovered symmetry of the wave functions and energies of the Stark sublevels of the 7F_6 , 7F_5 and 5D_4 multiplets in TbGG from a comparison of the MCPL and MCD power spectra, on the one hand, and the absorption and luminescence spectra, on the other hand, confirm the results of numerical calculations of the energy spectrum of the RE ion Tb^{3+} in terbium gallate garnet.

- It is shown for the first time that in the magneto-optics of radiative $4f \rightarrow 4f$ transitions in thulium-yttrium garnet-aluminate $Tm_{3+}:YAG$, the mechanism of "mixing" of the excited electronic states of the non-Kramers RE ion by an external field H dominates.

- It is shown that a significant MOA of the non-Kramers RE ion Ho^{3+} in garnet-gallate, found at low temperatures at the ${}^5S_2 \rightarrow {}^5I_8$ radiative transition, is unambiguously associated with the presence of quasi-doublet (i.e., "quasi-degenerate") states in the energy spectra of the 5S_2 and 5I_8 multiplets.

- For the first time, based on the results of comparing experimental data on the absorption, luminescence and magnetic susceptibility χ spectra measured along the [001] - "c" axis and the [110] axis of a rhombic TbAlO₃ crystal, the wave functions of the Stark sublevels of the ground ⁷F₆ and excited multiplets ⁷F_J ($J= 0.1, \dots, 6$), ⁵D_J ($J=3.4$) of the non-Kramers Tb³⁺ RE ion in the CF of C_s symmetry were analytically constructed.

- From a comparison of the data of optical studies performed in the temperature range 8 ÷ 300K along the crystallographic axis [110] of a magnetically active orthorhombic TbAlO₃ crystal, the values of the Stark energy intervals between the lowest sublevels of the ground ⁷F₆ and ⁷F_J ($J=0.1, \dots, 6$) are experimentally determined, ⁵D_J ($J=3.4$) of multiplets of the RE – Tb³⁺ ion and the symmetry of their wave functions in the CF C_s symmetry of the rhombic TbAlO₃ crystal

- For the first time, a difference in the temperature dependences of the Verdet constant V and magnetic susceptibility χ , measured along the crystallographic direction [110] of a rhombic TbAlO₃ crystal in the temperature range 85 ÷ 300K, was discovered.

- The observed strong anisotropy of the absorption spectrum (in linearly polarized light) of RE orthoaluminate TbAlO₃, at the $4f \rightarrow 4f$ transition ⁷F₆ → ⁵D₄, at a temperature of T = 78K is due, as a certain character of the symmetry of the wave functions of the lowest Stark sublevels of the ground ⁷F₆ and excited ⁵D₄ ion multiplets Tb³⁺ combining in the optical transition and the quasi-doublet nature of the ground state of the non-Kramers Tb³⁺ ion in the CF of C_s symmetry. Its presence in the spectrum of the ⁷F₆ multiplet is also confirmed by the results of numerical calculations of the energy spectrum performed in the framework of the theory of CF C_s symmetry.

Implementation of the research results. The photoelastic polarization modulator with optical positive feedback developed during the dissertation was successfully used to measure the spectra of MCD, MCPL and Faraday rotation of various $4f$ - and $3d$ -compounds, as well as to study the polarization properties of low-mode optical fibers. The results of the dissertation work concerning the coordinate transformation of the wave functions of the electronic states of non-Kramers KY ions into CF of D₂ and C_s symmetry are actively used in joint scientific research with US scientists. Some of the results of the work can also be applied during laboratory classes in the courses of physical optics, laser physics.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of Introduction, 7 Chapters, Conclusion, Appendix and References. The total number of the dissertation text pages is 246, including 50 figures and 10 tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. У.В.Валиев, J.B.Gruber, D.K.Sardar, А.К.Мухаммадиев, В.Ю.Соколов, Ш.А.Рахимов. Особенности магнитооптических спектров $Tb_3Ga_5O_{12}$. Оптика и спектроскопия // 2007, том 102, № 5.,-С.805-812 стр.

2. John B. Gruber, Dhiraj K. Sardar, Kelly L. Nash, У.В. Валиев, В. Соколов, Ш.А.Рахимов. Nonequilibrium population distribution in excited electronic states of Tb^{3+} in $Y_3Al_5O_{12}$ // Journal of applied physics, 103, 103103-1, 103103-6, 2008. <https://doi.org/10.1063/1.2921836>.

3. У.В.Валиев, Д.Р.Джураев, Ш.Мухамедханова, Н.М.Нарзуллаев, В.Ю.Соколов, Ш.А. Рахимов. Эффект зеемана в спектрах люминесценции тербий-иттрий алюминиевого граната // Известия высших учебных заведений, № 6, 2008 г. -С.38-45.

4. У.В.Валиев, John B. Gruber, Dhiraj K. Sardar, Kelly L. Nash, Gary W.Burdick, А.А.Узоков, Ш.А. Рахимов. Faraday effect and magnetic susceptibility analyses in $TbAlO_3$ // Journal of applied physics, 104, 073903-1, 073903-5, 2008. <http://doi.org/10.1063/1.2987474>.

5. У.В.Валиев, John B. Gruber, И.Р.Гапдулхаков, Н.И.Жураева, А.К.Мухаммадиев, И.С.Эдельман, Ш.А. Рахимов. Магнитооптика излучательного перехода $^1D_2 \rightarrow ^3F_4$ в тулий-иттриевом гранате-алюминате $Tm^{3+}:YAG$ // Оптика и спектроскопия, 2009, том 106, № 6, -С.959-966.

6. У.В.Валиев, Н.И.Жураева, Romano A. Rupp, Lijuan Zhao, Zhenhua Wang, Zhao Yang Zhai, Gary W.Burdick, John B. Gruber, Ш.А. Рахимов. Optical and magneto-optical properties of $Ho^{3+}:YGG$ //Physica status solidi B, 1-7, 2009. <https://doi.org/10.1002/pssb.200945318>.

7. John B. Gruber, Gary W. Burdick, Uygun V. Valiev, Kelly L. Nash, Sharof A. Rakhimov, Dhiraj K. Sardar. Energy levels and symmetry assignments for Stark components of $Ho^{3+} (4f^{10})$ in yttrium gallium garnet ($Y_3Ga_5O_{12}$) // Journal of applied physics, 106, 113110, 2009. <https://doi.org/10.1063/1.3259441>.

8. У.В. Валиев, J.B. Gruber, И.С. Эдельман, Ш.А. Рахимов. Анизотропия спектров поглощения редкоземельного ортоалюмината $TbAlO_3$ в поляризованном свете // Известия РАН. серия физическая, 2010, том 74, № 10, -С.1447–1449.

9. John B. Gruber, Uygun V. Valiev, Gary W. Burdick, Madhab Pokhrela, Dhiraj K. Sardar, Ш.А. Рахимов. Spectra, energy levels, and symmetry assignments for Stark components of $Eu^{3+} (4f^6)$ in gadolinium gallium garnet ($Gd_3Ga_5O_{12}$) //Journal of Luminescence 131 (2011), -С.1945-1952. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2011.03.057>.

10. Ш.А. Рахимов. К вопросу вычисления интенсивностей линий в спектрах люминесценции гольмий-иттриевого граната-галлата $Y_3Ga_5O_{12}:Ho^{3+}$. Доклады Академии наук Республики Узбекистан, №3, 2012 г.

-С.24-27.

11. У.В.Валиев, М.Е. Малышева, Ш.А. Рахимов, О.З. Султонов. Особенности эффекта Фарадея в редкоземельном ортоалюминате DyAlO_3 // Оптика и спектроскопия, 2022, том 130, № 6, -С.937-942. <https://doi.org/10.21883/OS.2022.06.52637.2892-21>.

И бўлим (II часть; Part II)

1. У.В.Валиев, Дж.Г.Груббер, Д.Р.Джураев, Б.Занди, Н.М.Нарзуллаев, К.С.Саидов, Ш.А. Рахимов. Особенности оптических и магнитных свойств РЗ-ионов Tb^{3+} и Dy^{3+} в магнитных диэлектриках// Физика в Узбекистане, Тезисы докл.конф. посвящ. году Физики - 2005, объявленному ЮНЕСКО, Ташкент, 27-28 сентября 2005, -С.63.

2. У.В. Валиев, В.Гирянский, Д.Р.Джураев, Ш.Мухаммедханова, Н.М.Нарзуллаев, Ш.А. Рахимов. Эффект зеемана в спектрах люминесценции тербий-иттрий алюминиевого граната // Труды научно-практического семинара лазерная физика, прикладные аспекты оптики и лазерной физики. Ташкент, 22 декабря 2006 года. -С.66 -71.

3. У.В. Валиев, А.К.Мухаммадиев, Ш.А. Рахимов. Магнитооптические спектры тербий-галлиевого граната $\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ // Труды научно-практического семинара лазерная физика, прикладные аспекты оптики и лазерной физики. Ташкент, 22 декабря 2006 года. -С.83-89.

4. Ш.А. Рахимов, Мухаммадиев А.К. Эффект зеемана особенности штарковского расщепления электронных состояний редкоземельного иона в тербиевых парамагнитных гранатах $\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ //III Международная конференция по молекулярной спектроскопии. Самарканд, 29-31 мая 2006 г. -С.119-120 стр.

5. Ш.А. Рахимов, Мухаммадиев А.К.Особенности магнитоциркулярной поляризации люминесценции в тербиевых гранатах $\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ и $\text{Tb}_x\text{Y}_{3-x}\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ // III Международная конференция по молекулярной спектроскопии. Самарканд, 29-31 мая 2006 г. -С.120-121.

6. У.В. Валиев, Ш.А. Рахимов, J.B.Gruber,D.K. Sardar,A.A. Uzokov,G.W. Burdick. Optical andMagnetooptikResearches of theSymmetry of ElektronikStates in TbAlO_3 // Magnetik and Super-conducting Materials MSM 07. 25th-30th September 2007, Khiva, Uzbekistan, 35.

7. У.В. Валиев, Ш.А. Рахимов, J.B.Gruber, D.K.Sardar, A.A.Uzokov, G.W.Burdickи др. Spectroscopic and magnetic Susceptibility Analyses of the 7FJ and 5D4 Multiplet Manifolds of Tb^{3+} (4f8) in TbAlO_3 // Magnetik and Super-conducting Materials MSM 07. 25th-30th September 2007, Khiva, Uzbekistan, 35.

8. У.В.Валиев, Ш.А. Рахимов, John B. Gruber, Dhiraj K. Sardar, Kelly L. Nash, Gary W.Burdick, A.A.Узоков. Faraday effect and magnetic susceptibility analyses in TbAlO_3 . Республиканской научно-практической конференции по «Оптические методы в современной физике», г.Ташкент, НУУз, 7-8 мая 2008, -С.148-153.

9. У.В.Валиев, Ш.А. Рахимов, John V. Gruber, Н.И.Жураева, А.Александровский, А.В.Малаховский, И.С.Эдельман. Спектрально-люминесцентные и магнитооптические исследования иона Tm^{3+} в кристаллах различной симметрии // Республиканской научно-практической конференции по «Оптические методы в современной физике», г.Ташкент, НУУз, 7-8 мая 2008, -С.153-157.

10. У.В. Валиев, Ш.А. Рахимов, И.С.Эдельман, А.А.Узоков. Анизотропия спектров поглощения редкоземельного ортоалюмината $TbAlO_3$ в поляризованном свете // XXI Международная конференция по Новое Магнетизме и Магнитных Материалах. г.Москва, МГУ им.М.В.Ломоносова, 28 июня-4 июля 2009 г. -С. 230-232.

11. У.В.Валиев, Ш.А. Рахимов, John V. Gruber, Н.И.Жураева, И.С.Эдельман, А.К.Мухаммадиев. Магнитная циркулярная поляризация люминесценция излучательного перехода $^1D_2 \rightarrow ^3F_4$ в $Tm^{3+}:YAG$ // Республиканской конференции по «Современная физика и ее перспективы», г.Ташкент, НУУз, 12-13 ноября 2009, -С.265-268.

12. У.В. Валиев, Ш.А. Рахимов, John V. Gruber, Dhiraj K. Sardar, Gary W.Burdick, M.Pokhrel. Spectra, energy levels, end symmetry assignments for stark components of $Eu^{3+}(4f^6)$ in gadolinium gallium garnet GGG ($Gd_3Ga_5O_{12}$) // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM) August 21-25, 2011, 203.

13. М.Е. Мальшева Ш.А. Рахимов. Магнитооптический эффект Фарадея в редкоземельном гранате ортоалюминате $TbAlO_3$ // Иқтисодий тармоқлари ва ижтимоий соҳанинг энергия самарадорлигини оширишга қаратилган автоматлаштириш ва энергетика муаммоларни ечишда илғор инновацион технологиялар ва таълимнинг ўрни: Халқаро илмий-амалий конференцияси материаллари, НМТИ, 24-25 июнь. Наманган, 111-114 б., 2021.

Avtoreferat “Durdoni” nashriyotida taxrirdan o‘tkazildi
hamda o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarini mosligi tekshirildi.

Bosishga ruxsat etildi: 25.04.2024 Bichimi: 60x84 1/16.
“Times New Roman” garniturada raqamli bosma usulda bosildi.
Shartli bosma tabog‘i: 4. Adadi 100. Buyurtma № 135.
Guvoxnoma AI №178.08.12.2010

“Sadriiddin Salim Buxoriy” MCHJ bosmaxonasida chop etilgan.
Buxoro shahri, M. Iqbol ko‘chasi, 11-uy. Tel.: 65 221-26-45

