

**ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI  
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

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

**TUROTOV FURKAT KULDOSH O‘G‘LI**

**“TULIY  $Tm^{3+}$ , YEVROPIY  $Eu^{3+}$  VA TERBIY  $Tb^{3+}$  IONLARI BILAN  
FAOLLASHTIRILGAN ITTRIYLI GRANAT VA ITTRIYLI FTORID  
KRISTALLARINING MAGNITOOPTIK VA OPTIK XOSSALARI”**

**01.04.05 – Optika**

**Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi**

**AVTOREFERATI**

**Toshkent-2025**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
avtoreferati mundarijasi**

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

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

**Turotov Furkat Kuldosh o'g'li**

Tuliy  $Tm^{3+}$ , Yevropiy  $Eu^{3+}$  va Terbiy  $Tb^{3+}$  ionlari bilan faollashtirilgan ittriyli granat va ittriyli ftorid kristallarining magnitooptik va optik xossalari.....5

**Туротов Фуркат Кулдош ўғли**

Магнитооптические и оптические свойства кристаллов иттриевых гранатов и иттриевых фторидов, активированных ионами Тулия  $Tm^{3+}$  Европия  $Eu^{3+}$  и Тербия  $Tb^{3+}$  .....22

**Turotov Furkat Kuldosh o'g'li**

Magneto-optical and optical properties of yttrium garnet and yttrium fluoride crystals activated by Thulium  $Tm^{3+}$  Europium  $Eu^{3+}$  and Terbium  $Tb^{3+}$  ions.....40

**E'lon qilingan ishlar ro'yxati**

Список опубликованных работ

List of published works.....43

**ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI  
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

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

**TUROTOV FURKAT KULDOSH O‘G‘LI**

**“TULIY  $Tm^{3+}$ , YEVROPIY  $Eu^{3+}$  VA TERBIY  $Tb^{3+}$  IONLARI BILAN  
FAOLLASHTIRILGAN ITTRIYLI GRANAT VA ITTRIYLI FTORID  
KRISTALLARINING MAGNITOOPTIK VA OPTIK XOSSALARI”**

**01.04.05 – Optika**

**Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
AVTOREFERATI**

**Toshkent-2025**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi oliy ta'lim fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.2.PhD/FM889 raqami bilan ro'yxatga olingan.**

Dissertatsiyasi Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy Universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida ([www.iplt.uz](http://www.iplt.uz)) va «Ziyonet» Axborot ta'lim portalida ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:**

**Valiyev Uygun Vaxidovich**

Fizika-matematika fanlari doktori, professor.

**Rasmiy opponentlar:**

**Eshchanov Baxodir Xudayberganovich**

Fizika-matematika fanlari doktori, professor.

**Raximov Raximbergan Yuldashevich**

Fizika-matematika fanlari doktori, katta ilmiy xodim.

**Etakchi tashkilot:**

**Samarqand davlat universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti huzuridagi **DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 raqamli** Ilmiy kengashning 2025-yil "17" iyun soat 16:00 da majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100125, Toshkent, Do'rman yo'li ko'chasi, 33-uy. Tel./faks: (+99871) 262-32-54; email: [info@iplt.uz](mailto:info@iplt.uz), Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti majlislar zali.

Dissertatsiya bilan Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti Axborot-resurs markazida tanishish mumkin. (№ 8 raqami bilan ro'yxatga olingan.) Manzil: 100125, Toshkent, Do'rman yo'li ko'chasi, 33-uy. Tel./faks: (+99871) 262-31-69;

Dissertatsiya aftoreferati 2025-yil "3" iyun da tarqatildi.

(2025-yil "3" iyun da № 8 raqamli reestr bayonnomasi).



**X.B. Ashurov**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash raisi, texnika fanlari doktori, professor

**I.D. Yadgarov**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash ilmiy kotibi, fizika-matematika fanlari doktori, professor

**U.K. Maxmanov**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi, fizika-matematika fanlari doktori, professor

## **KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)**

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati:** Fizikaning ikki fundamental sohalari - fizikaviy optika va magnit hodisalar fizikasi chegarasida yuzaga kelgan nodir yer birikmalarining zamonaviy magnitoptik spektroskopiyasi turli nodir yer materiallarining 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.

Ittiry alyuminiyli granatlar asosidagi nodir yer birikmalari va fluoridli nodir yer birikmalarining noyob fizik – kimyoviy xususiyatlaridan quyosh energiyasi konsentratsiyalarida, optik tolali yorug'lik tashuvchilar, svetovodlarda, ultrabinafshaviy, ko'rinadigan va o'rta infraqizil diapazonlarda ishlaydigan qator sensorlar uchun optik materiallar ishlab chiqarishda legirlovchi qo'shimchalar qo'shish, qattiq jisimli lazerlar yaratishda qo'llaniladigan materiallar sifatida foydalanish katta qiziqish uyg'otadi.

Bu qiziqish quyidagi hol bilan tushuntiriladi, ya'ni magnitoptik effektlarni birdan bir manbai xuddi shunday  $Tm^{3+}$ ,  $Tb^{3+}$ , va  $Eu^{3+}$  nokramers NY ionlarining to'la aynimagan elektron holatlari magnit momentlari “kvazidublet” holati deb yuritiluvchi holatlarni yuzaga keltiruvchi yaqin joylashgan Shtark singletlari to'lqin funksiyalarining “aralashish” (tashqi magnit maydon) mexanizmi bilan tushuntirilishi mumkin. Shu sababli  $Tm^{3+}$ : (YAG) va  $TbF_3$  lar nurlanish spektrlarining yangi tadqiqotlari, ya'ni differensial magnitoptik metodlardan foydalangan holda keltirilsa (Zeeman effekti, magnit sirkulyar qutblanish lyuminessensiyasi) juda foydali bo'lar edi, chunki ularning qo'llanilishi  $Tm^{3+}$  nokramers ionlarida yaqin joylashgan Shtark sath ostilari (ya'ni “kvazidublet”) simmetriyalari va joylashishlarini aniqlashda muhim ro'l o'ynaydi.

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 Murojaatnomasi 1, 2021 yil 19 martdagi PQ-5032-sonli “Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni takomillashtirish chora-tadbirlari 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 texnikasini rivojlantirishning: II “Energiya, energiya va resurslarni tejash, transport, mashina va asbobsozlik; zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika, elektron asboblarni ishlab chiqish” ustuvor yo'nalishlariga muvofiq amalga oshirildi.

**Muammoning o'rganilganlik darajasi:** Bugungi kundagi NY magnit dielektriklarining fundamental tadqiqotlariga qiziqish tobora kuchayib bormoqda, chunki ular qattiq jismlar fizikasi sohasida magnit hodisalarini fizikasining fundamental muammolarini hal qilishda muhim rol o'ynaydi.

So‘nggi 10-15 yil ichida nodir yer metallari va ular asosidagi birikmalari magnitoptikasi va optikasiga bag‘ishlangan ishlar soni keskin ortdi.

Ortorombik simmetriyali ( $P_{nma}$  fazoviy guruh)  $TbF_3$  terbiy triflorid kristali past temperaturalarda magnetik, optik va magnitoptik xususiyatlarning keng spektrini namoyon qiladi. Masalan paramagnit terbiy kristalida  $Tb^{3+}$  ionlari magnit momentlarining kuchli ferromagnit tartiblashishlari tasodifan, odatda NY – ionlari kiritilgan rombik simmetriyali kristallarda past temperaturalarda ( $T_N \sim 3,8$  K) kuzatiladigan antiferramagnit tartiblashishlardan farqli o‘laroq, ortorombik kristallarda ( $T_C \sim 3,95$  K) magnit kirituvchanligi va solishtirma issiqlik sig‘imlarining temperaturaviy bog‘lanishlarini tadqiq qilish jarayonida kuzatildi (aniqlandi). Bundan tashqari  $TbF_3$  kristal optik nuqtai nazardan ortorombik strukturaning biror bir kristallografik o‘qi (a, b, c) bilan mos tushmaydigan “kvazi bir o‘qli kristal” sifatida qaraladi, bu esa ushbu anizotrop kristallarida olib boriladigan magnitoptik tadqiqotlarini (Faradey aylanish burchagini o‘lchash va boshqa tadqiqotlar) qiyinlashtiradi va ular ko‘p ishni talab qiladi. Bu borada triflorid kristalining turli kristallografik yo‘nalishlari bo‘ylab qo‘yilgan magnit maydonlarida ionlar elektron holatlarining Zeeman ajralishlarini tadqiq qilish samaraliroqdir.

Shu vaqtgacha olib borilgan tadqiqotlarda  $Tb^{3+}$  ionlari multeplatlarning Shtark sath ostilari simmetriyalari identifikatsiyasi amalga oshirilmaganligi sababli, bu hol qo‘shimcha eksperimental tadqiqotlarni amalga oshirish uchun turtki bo‘ldi.  $Tm^{3+}$ : YAG kristallarining yutilish va lyuminessensiya spektrlari J.B Gruber va boshqalar tomonidan turli temperaturalarda (past temperaturalar ham kiradi) ko‘rinadigan va yaqin infraqizil sohalarda batafsil o‘rganildi. Optik o‘tishlar  $^1D_2$ ,  $^3H_6$ ,  $^3F_4$ ,  $^3F_3$  va  $^3F_2$  multipletlar  $^1D_2$  holatidan o‘tishlar sodir bo‘lgan jarayonlarda nurlanish spektrlarini tadqiq qilishda foydalanildi. Bu olingan kattaliklar granat strukturasida  $Tm^{3+}$  ionining asosiy  $4f^{(n)}$  – konfiguratsiyasiga tegishli aksariyat multipletlar (ya‘ni J, L, S-holatlar) kristal maydon (KM) ajralishlari tasdiqlovchi axborotlarni berish bilan bir qatorda ushbu multipletlardagi Shtark sath ostilari simmetriyalari to‘g‘risida ma‘lumotlar beradi. Bizningcha granat – alyuminat strukturalarida  $Tm^{3+}$  ionlari uchun ilgari olingan energetik spektrlar ularga mos kvazidublet holatlarini qo‘shish orqali to‘ldirilishi kerak. Yuqorida ko‘rsatib o‘tilgan NY birikmalarining optik va magnit xususiyatlarini tadqiq qilishda yuzaga kelgan qarama – qarshiliklar, ushbu tadqiqot ishini amalga oshirish zaruriyatini yuzaga keltirdi.

Yuqoridagilardan kelib chiqqan holda, ushbu dissertatsiya ishida optik, magnit va magnitoptik o‘lchash metodlaridan foydalangan holda, granat va ortoalyuminat kristallografik strukturali NY birikmalarida nokramers NY ionlari elektron holatlarining Shtark va Zeeman ajralishi xususiyatlarini batafsil tadqiq qilish vazifasi qo‘yildi.

**Dissertatsiya tadqiqotlarining dissertatsiya bajarilgan oliy ta‘lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi:** Dissertatsiya ishi bevosita hozirgi vaqtda Mirzo Ulug‘bek nomidagi O‘zbekiston Milliy universitetida olib borilayotgan “Kondensirlangan muhitlarning optik tadqiqotlari” mavzuidagi davlat granti doirasida olib borilmoqda. Natijalarning bir qismi Mirzo

Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universitetida olib borilayotgan O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Fan va texnologiyalarni rivojlantirishni muvofiqlashtirish qo'mitasining FZ - 202009143 raqamli "Magnit maydoni yordamida nodir yer elementlari bilan faollashtirilgan oksidli va fluoridli kristallarning optik xarakteristikalarini boshqarish" loyihasi doirasida olingan (2022-2026 yillarga mo'ljallangan).

**Tadqiqotning maqsadi:** Quyi simmetriyali kristall qobiqda uch valentli NY ( $Tb^{3+}$ ,  $Tm^{3+}$  va  $Eu^{3+}$ ) ionlari energetik spektrida "kvazidublet" holatlarini aniqlash maqsadida granat va triflorid strukturalarida NY ionlarining optik va magnitoptik xususiyatlarini eksperimental tadqiq qilish hisoblanadi.

**Tadqiqotning vazifalari:**

elektrodipol yaqinlashishda man qilingan  $4f \rightarrow 4f$  optik o'tishlarni identifikatsiya qilish va tadqiq qilinayotgan o'tishlarda kombinatsiyalanuvchi  ${}^5D_4$  va  ${}^7F_6$  Shtark sath osti energiyalarni aniqlash maqsadida spektrning ko'rinadigan sohasida  $TbF_3$  kristalining optik spektrlarini eksperimental tadqiq qilish;

$TbF_3$  kristalida  $T = 90$  K temperaturada  $[001]$  («c» o'qi) va  $[010]$  («b» o'qi) kristal o'qlari bo'ylab tarqaluvchi chiziqli – qutblangan yorug'likda Zeeman effektini eksperimental tadqiq qilish;

$D_2$  simmetriyali kristal qobiqda  ${}^3F_4$ ,  ${}^1G_4$ ,  ${}^1D_2$  va  ${}^3H_6$  multipletlari uchun Shtark sath ostilarini identifikatsiya qilish va spektrning ko'rinadigan sohasida  $Tm^{3+}$ :YAG kristalining ikkilamchi nurlanish spektrlarini eksperimental o'rganish;

$Tm^{3+}$ : YAG kristalida  $Tm^{3+}$  ionlarining magnit sirkulyar qutblanish lyuminessensiyasi spektrlari (MSQL) darajalarining past temperatura lyuminessensiya spektrlarni tahlil qilish natijalaridan foydalanib,  $D_2$  simmetriyali kristal qobiqda mavjud bo'lgan  $Tm^{3+}$  ionlarining  ${}^3F_4$ ,  ${}^1D_2$  va  ${}^3H_6$  multipletlari energetik spektrlarida kvazidublet holatlar va ularning energiyalari mavjudligini aniqlash;

magnitoptik tadqiqotlar asosida  $Tm^{3+}$ : YAG kristalida  $Tm^{3+}$  ionlarining  ${}^3F_4$ ,  ${}^1D_2$  va  ${}^3H_6$  multipletlari kvazidublet holatlarining Zeeman ajralishlarini hisoblash;

magnit kirituvchanligi va Verde doimiylarining temperaturaga bog'liqliklarini o'rganish asosida  $EuGaG$  kristalning Verde doimiysining magnit kirituvchanlikka bog'lanish xarakterini tadqiq qilish.

**Tadqiqotning predmeti:**  $TbF_3$  va  $Tm^{3+}$ : YAG kristallarining optik xossalari (yutilishi va lyuminessensiyasi) asosida tashqi magnit maydon qo'yilganda kuzatiladigan magnitoptik xossalari (MDD va MSQL).

**Tadqiqotning obyekti:** terbiyli triflorid monokristallari, tarkibida tuliy ioni bo'lgan ittriy alyuminiyli granatlar va yevropiy – galliy granati.

**Tadqiqotning metodlari:** Eksperimental tadqiqotlarda differensial magnitoptika magnit sirkulyar qutblanish lyuminessensiyasi va Zeeman effekti metodlaridan foydalanildi. Optik xususiyatlarni o'lchash optik yutilish, lyuminessensiya va lyuminessensiyaning uyg'otilish spektrlarini (LUS) tadqiq qilish asosida amalga oshirildi. Magnitlangan namunadan chiqayotgan yorug'lik oqimini modulyatsiyalashgan qutblash metodi; sinxron detektorlash metodi;

eksperimental axborotlarni qayta ishlashning matematik va sonli hisoblash metodlari va boshqalar.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi:**

ilk marotaba TbF<sub>3</sub> kristal optik spektrlarining tahlili asosida 4f→4f va 4f→5d o'tishlar uyg'otilishi ko'rsatib berildi. Ularning energiyalari spektrning UB sohasida joylashgan bo'lib ular spektrning ko'rinadigan sohasida 4f→4f o'tishlar <sup>5</sup>D<sub>4</sub>→<sup>7</sup>F<sub>6</sub> va <sup>5</sup>D<sub>4</sub>→<sup>7</sup>F<sub>5</sub> emission taqiqlangan elektrodipol yaqinlashishda intensiv polosalarning paydo bo'lishiga olib kelishi tajribada aniqlandi;

birinchi marta 90 K temperaturada sharoitida Tb<sup>3+</sup> ionning <sup>5</sup>D<sub>4</sub> → <sup>7</sup>F<sub>6</sub> multipletlari Shtark sath ostilari orasidagi optik o'tishlar bilan bog'liq TbF<sub>3</sub> kristalida o'lchangan yutilish va fluoressensiya spektrlarini solishtirish asosida optik o'tishlar sxemasi tuzildi va sath ostilari energiyalari hamda NY ioni multipletlaridagi kombinatsiyalanuvchi optik o'tishlarda joylashishlari o'rganildi;

Ilk marotaba Zeeman effekti tadqiqotlari asosida chiziqli qutblangan yorug'lik nurining [001] kristallografik o'qi bo'ylab tashqi magnit maydoni [100] o'qiga parallel bo'lgan holda TbF<sub>3</sub> kristalida yaxshi ajratilgan <sup>7</sup>F<sub>6</sub>→<sup>5</sup>D<sub>4</sub> dublet yutilish polosasining  $D = 10.7 \text{ sm}^{-1}$  bo'lgan dastlabki ajralishining kamayishiga olib kelishi tajribada aniqlandi;

boshqa eksperimental geometriyasida, H tashqi magnit maydoni <sup>7</sup>F<sub>6</sub> multipletining asosiy kvazidublet holatini ajralishiga olib kelmasligi aniqlandi.  $20730 \text{ sm}^{-1}$  energiyada kuzatiladigan yutilish chizig'i Zeeman ajralishlariga duchor bo'ladi va uning kattaligi H tashqi magnit maydon kuchlanganligi ortishi bilan ortadi, bu hol C<sub>s</sub> simmetriyasining kristal qobiqda nokramers NY – ioni magnitlanishining o'ziga xos xususiyatlariga bog'liq bo'lishi ko'rsatib berildi;

birinchi marta Tm<sup>3+</sup>: YaG tulliy - itriyli granat – alyuminat monokristalida magnitoptik (MSQL) va optik (lyuminessensiya) effektlari spektral bog'lanishlari tahlili asosida YAG granat – alyuminatda <sup>1</sup>G<sub>4</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub>, <sup>1</sup>D<sub>2</sub>→<sup>3</sup>F<sub>4</sub> va <sup>1</sup>D<sub>2</sub>→<sup>3</sup>F<sub>3</sub> lyuminessensiya polosalarida Tm<sup>3+</sup> NY – ionining uyg'otilgan <sup>1</sup>D<sub>2</sub>, <sup>3</sup>F<sub>4</sub>, <sup>3</sup>G<sub>4</sub> va asosiy <sup>3</sup>H<sub>6</sub> multipletlarida "kvaziaynigan" holatlar mavjudligi tajribada aniqlandi. Tm<sup>3+</sup> nokramers ionidagi taqiqlangan 4f → 4f o'tishlar bilan bog'liq lyuminessensiya polosalarida magnitoptik effektlar paydo bo'lishi mexanizmlari ko'rsatib berildi;

ilk marotaba yevropiy – galliyli granat kristalida FEni tadqiq qilish asosida *EuGaG* da Verde doimiysining ushbu granat magnit kirituvchanligiga bog'liqligi tajribada o'rganildi.

**Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:** NY granatlarining optik va magnitoptik xususiyatlari negizida turli magnitoptik qurilmalar, spektrning ko'rinadigan va UB sohalarida ishlovchi displey, optik izolyatorlar, yorug'lik nurlanishi modulyatori, NY birikmalar tadqiqot natijalardan fotonika va rentgen rentgen ssintillyatorlarida aktiv va passiv elementlar sifatida foydalanish, standart optik damlashdan foydalanib ko'rish diapazonida ishlaydigan generatorlarda faol muhit, NY birikmalarida tadqiqot natijalardan kuchli lazer sistemalarida samarali optik izolyatorlarni yaratish hisoblanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati:** C<sub>s</sub> va D<sub>2</sub> simmetriyali kristall maydonlarda tadqiq qilinayotgan Tb<sup>3+</sup> va Tm<sup>3+</sup> nodir yer ionlari energetik

spektrlaridagi nozik strukturalar to'g'risida to'la axborot olish hisoblanadi. Shuningdek, magnitoptik effektlar kattaliklariga ta'sir ko'rsatuvchi magnitoptik faollikning turli mexanizmlarini aniqlash imkoniyatlari hisoblanadi. Olingan eksperimental natijalar multipletlarning sath ostilaridagi magnitoptik o'tishlarda ishtirok etuvchi Zeeman ajralishlari kattaliklarini hisoblash imkonini beradi.

Olib borilgan qutblanish – optik va magnitoptik tadqiqot natijalari shundan darak beradiki, tarkibida boshqa NY ionlari bo'lgan kristallar ( $Tb^{3+}$ ,  $Tm^{3+}$  va  $Eu^{3+}$ ) turli lidar sistemalar uchun biologiya, meditsina texnologiyalarida amalda keng qo'llaniladigan spektrning ko'rinadigan va o'rta infraqizil diapazonda ishlovchi lazerlar uchun istiqbolli muhitlar ekanligidan dalolat beradi.  $TbF_3$  kristallar oilasi matritsada ko'p sondagi  $R^{3+}$  ionlarini o'z ichiga oladi va fotonika va optikaning faol va passiv elementlari sifatida foydalanish mumkin.  $TbF_3$  kristali  $Tb^{3+}$  ionlari magnit momentining yuqori kattaliklariga ega bo'lganligi sababli magnitoptika va magnetizm tadqiqotlari uchun istiqbolli material hisoblanadi.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi:** Olingan tadqiqot natijalarining nazariy hisob-kitoblar natijalari bilan solishtirish imkoni bilan tushuntiriladi. Magnitoptik tadqiqotlarni amalga oshirishda spektral bog'lanishlarni qayd qilish va qayta ishlashning zamonaviy metodlaridan foydalangan va parallel ravishda boshqa mualliflar tomonidan amalga oshirilgan tadqiqot natijalari bilan solishtirish orqali hosil qilingan.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi:** Ushbu dissertatsiya ishi doirasida NY ionlarining optik, magnitoptik va energetik spektrlarini hisoblash usuli va NY ionlarining optik xossalari tashqi magnit maydoni ta'siridan:

«Metall oksidlari bilan legirlangan silikatlardagi termoelektrik xususiyatlar va o'z-o'zini tashkil qilish jarayonlari» mavzusidagi O'zbekiston–Hindistonning Uzb-Ind-2021-78-raqamli qo'shma fundamental tadqiqotlar loyihasi ilmiy-texnikaviy vazifalarini bajarishda foydalanilgan (Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universitetining 2025-yil 01/11-2954-sonli ma'lumotnomasi).

Ilmiy tadqiqot natijalardan foydalanish silikat shishalarni metall oksidlari bilan legirlash jarayonida hosil bo'luvchi nanokristallardagi struktura o'tishlari optik xossalari, legirlangan silikat shishaning tarkibidagi NY metallari ionlarining elektr o'tkazuvchanligi, optik xossalari va termoEYuK koeffitsientiga ta'sirini o'rganish imkonini bergan.

Optical Materials, jurnalida nashr etilgan tadqiqot natijalarimizdan xorijiy jurnallardagi ilmiy maqolalarda (PHYSICAL REVIEW MATERIALS 7 034401 2023. IF= 7; Journal of the American Chemical Society Vol 146, Issue 49 IF= 14.5; Microwave and Optical Technology Letters Volume 65, Issue 6, June 2023. IF= 3.1) past temperaturalarda tashqi magnit maydonda kristallarda bo'ladigan fizikaviy jarayonlar tushuntirishda foydalanilgan. Ilmiy natijalardan foydalanish Tb/Eu asosidagi lyuminessensiya termometrlardagi muammolarni tushuntirishda va  $TbScO_3$  kristalining tashqi magnit maydondagi fizik xususiyatlarini tushuntirish imkonini bergan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi:** Dissertatsiya ishining najjalari 5 ta xalqaro va respublika ilmiy – amaliy anjumanlarida ma’ruza qilingan va muhokamadan o’tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e’lon qilinishi:** Dissertatsiya ishining mavzusi bo’yicha olingan natijalar asosida 10 ta ilmiy ish nashr qilingan, shundan O’zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya kommissiyasining tavsiya qilgan ilmiy nashrlarda 5 ta ilmiy maqola, shu jumladan 3 tasi xorijiy nufuzli ilmiy jurnallardagi maqolalar bo’lib, 2 tasi mahalliy jurnalda. Shuningdek 5 ta ma’ruza materiallari xalqaro va respublika konferensiyalarida chop etilgan

**Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi:** Dissertatsiya tarkibi kirish, to’rtta bob, xulosa, adabiyotlar ro’yxati, 21 ta rasm va 2 ta jadvaldan iborat. Dissertatsiya matni 112 betni tashkil etadi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish** qismida mavzuning dolzarbligi asoslab berilgan, tadqiqotning maqsad va vazifalari shakllantirilgan, mavzuning obykti va predmeti tavsiflangan, tadqiqotning respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining ustuvor yo’nalishlariga mos kelishi ko’rsatib berilgan, tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati va ilmiy yangiligi bayon qilingan, olingan natijalarning amalda qo’llanilishining ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan. Dissertatsiya strukturasi va dissertatsiya mavzusi bo’yicha chop etilgan ishlar haqida ma’lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning «**Tm<sup>3+</sup> va Eu<sup>3+</sup> ionli granatlar va TbF<sub>3</sub> ftoridli kristallarning magnit va optik xususiyatlari**» mavzusidagi birinchi bobi obzor xarakterda bo’lib, unda paramagnit granatlar va triflorid kristallaridagi Tb<sup>3+</sup>, Tm<sup>3+</sup> va Eu<sup>3+</sup> nodir yer ionlarining kristallografik tuzilishi, magnitoptik xususiyatlari bo’yicha shu vaqtgacha olib borilgan tadqiqotlar batafsil tahlil qilingan.

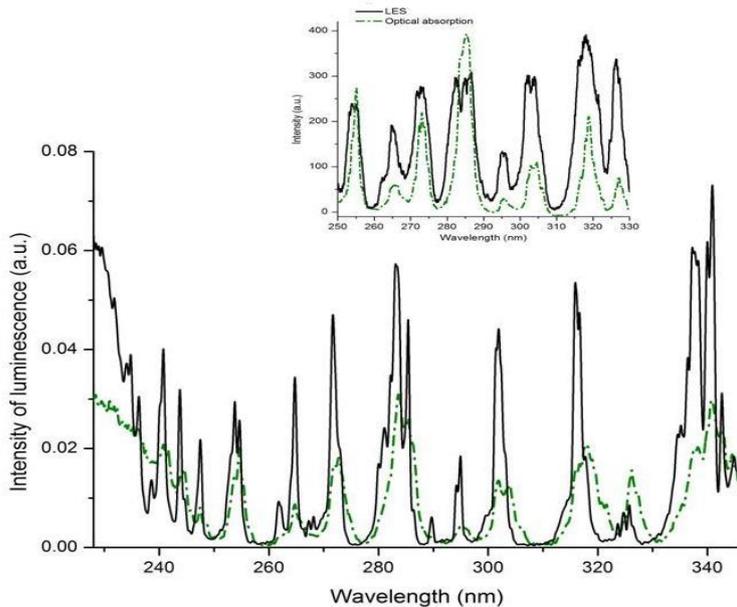
Dissertatsiyaning «**Esperimental qurilmalar, o’lchashlar metodikalari va namunalar**» deb nomlangan ikkinchi bobda tadqiq qilingan namunalar, ularning optik, magnit va magnitoptik tadqiqotlarini amalga oshirish uchun ishlatiladigan eksperimental qurilmalar va o’chash metodikalari qisqacha bayon qilingan.

Tadqiqotlar amalga oshirilgan « Tm<sup>3+</sup> YAG va EuGaG granatlari monokristallari Germaniyadagi Darmshtadt texnika universiteti Fizika institutida “Eritma – qotishma“ dan spontan kristallashish metodi bo’yicha o’stirilgan.

Tadqiq qilingan namuna tarkibida ~ 1% Tm<sup>3+</sup> ionlari mavjud bo’lib, ular [110] va [001] tipidagi kristallografik tekisliklarda orientirlangan va qirqib olingan.

TbF<sub>3</sub> monokristallari Shubnikov nomidagi kristallografiya instituda (Rossiya) yo’naltirilgan kristallashish metodida o’stirildi. Optik, magnitoptik tadqiqotlarni amalga oshirishda quyidagi eksperimental qurilmalardan foydalanildi:

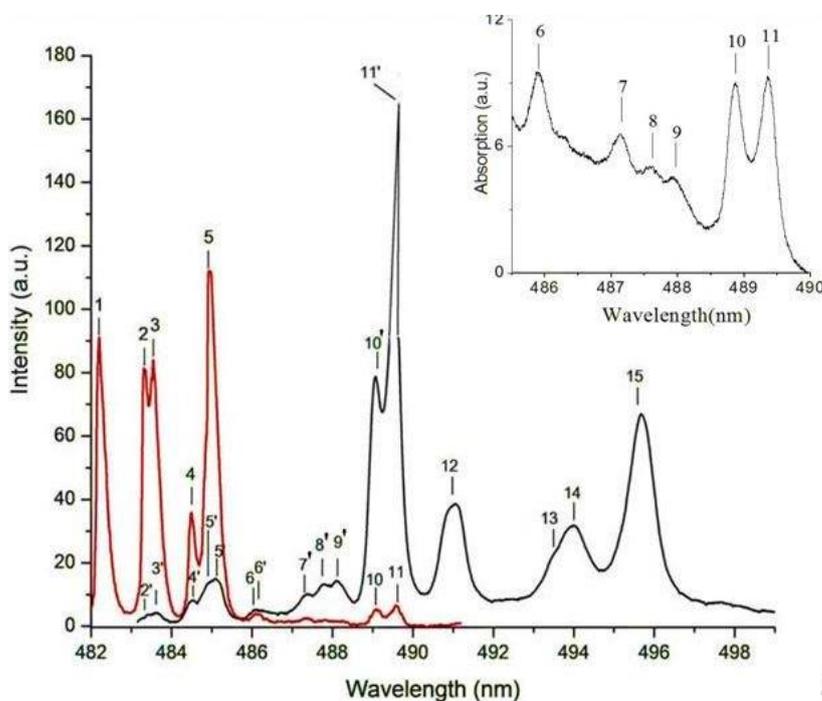
1. MSQ darajalari spektrini o’lchash qurilmasi:
2. Lyuminessensiyani o’lchash qurilmasi:
3. MDD spektrlarni o’lchash qurilmasi
4. Zeeman effektini o’lchash qurilmasi.



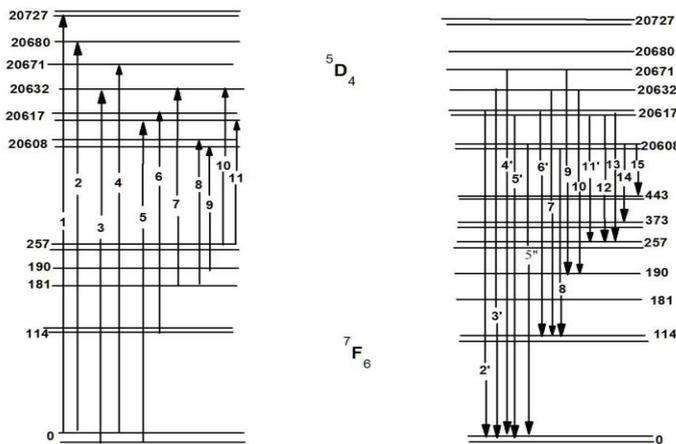
**1 - Rasm.**  $T = 25$  K (uzluksiz chiziq) va  $300$  K (uzuq chiziq) temperaturalarda (100) tekisligida yozib olingan. Uygʻonish lyuminessensiya spektrlari (ULS) kuzatilgan. Toʻlqin uzunligi  $\lambda = 542.2$  nm. Ilovada ULS larni  $T = 300$  K temperaturalarda yutilish spektrlari (uzluksiz chiziq) bilan solishtirish natijalari.

$TbF_3$  kristali yutilish spektrlari bilan solishtirish (1-rasm qaragʻan) orqali oʻz tasdigʻini topdi.  $230$  nm toʻlqin uzunligidan quyidagi sohalarda LUS spektrlarining keskin kamayishi va shakl buzilishiga olib keluvchi intensiv optik UB – yutilish sohasi boshlanadi, bu esa  $Tb^{3+}$  ionlaridagi ruxsat etilgan (spin va juftlik boʻyicha)  $4f^{(8)} \rightarrow 4f^{(7)} 5d$  elektrodipol oʻtishlar nurlanishini absorbsiyasi tufayli yuzaga kelishi mumkin. Energiyalari spektrning UB – sohasida joylashgan uygʻotilgan  $4f \rightarrow 4f$  va  $4f \rightarrow 5d$  oʻtishlar emision jixatdan taqiqlangan (elektrodipol yaqinlashishga)  $4f \rightarrow 4f$  oʻtishlar bilan bogʻliq lyuminessensiyaning paydo boʻlishiga

Dissertatsiyaning « $TbF_3$  kristallaridagi nodir yer ionlarining elektron holatlari Zeeman ajralishlarining oʻziga hos xususiyatlari» deb nomlangan uchinchi bobda Zeeman effekti va  $TbF_3$  kristalidagi optik spektrlarni tadqiq qilish natijalari keltirilgan. Olingan natijalardan koʻranadiki, spektrning  $240 - 340$  nm spektral oraligʻida lyuminessensiyaning uygʻotish spektri (LUS) tor taqiqlangan (elektrodipol yaqinlashishda)  $4f \rightarrow 4f$  oʻtishlar kuzatildi. Bu oʻz navbatida LUS spektrlarini xuddi shu spektral sohada yozib olingan natijasida isbotlandi (1-rasm



**2 - Rasm.** Triflorit terbiya ortorombik kristalning [001] kristallografik oʻq boʻylab past temperaturalarda ( $90$  K) oʻlchangan yutilish va lyuminessensiya optik spektrlari (qora rangda). Optik spektrlar xarakteristikalarida foydalanilgan belgilashlar matnda keltirilgan.



**3 – rasm.** 90 K temperaturada  $TbF_3$  kristalda  $Tb^{3+}$  NY ioning  $7F_6$  va  $5D_4$  multipletlari shtark komponentalari orasidagi optik o'tishlar sxemasi. Yutilish o'tishlari sxemasi chapda, lyuminessensiya o'tishlari sxemasi esa o'ngda keltirilgan.

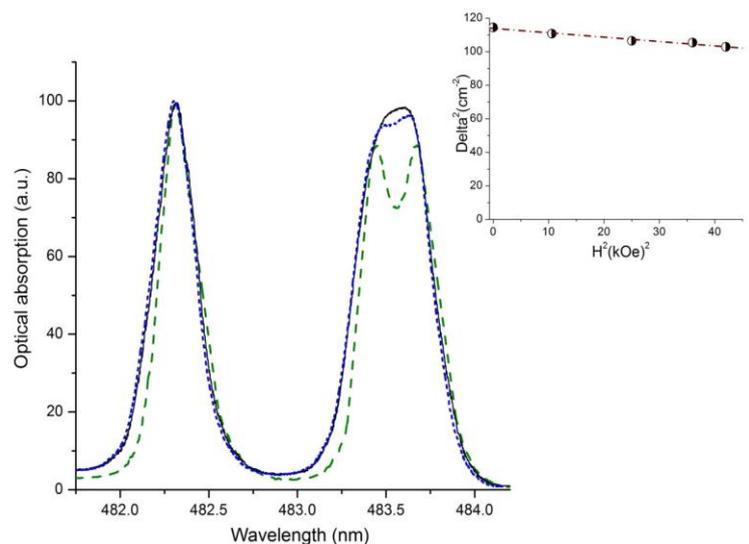
chiziqlar 6 va undan yuqori raqamlar bilan belgilangan bo'lib ular  $7F_6$  multipletning yuqori energiyali sathlaridan uyg'otilgan  $5D_4$  multiplet sath ostilaridagi optik o'tishlarga mos keladi va 2 – rasmning ilovasida ularning kichik intensivligi tufayli ular alohida keltirilgan.

90 K temperaturada  $Tb^{3+}$  ioni  $5D_4$  va  $7F_6$  multipletlari Shtark sath ostilari orasida sodir bo'luvchi optik o'tishlar bilan bog'liq yutilish va lyuminessensiya spektrlarini o'lchash natijalarini solishtirish 3-rasmda keltirilgan optik o'tishlar sxemasini tuzish, sath ostilari energiyalarini aniqlash va ularning multipletlaridagi optik o'tishlarda kombinatsiyalanuvchi joylashishlarini aniqlash imkonini beradi.

Tadqiq qilingan kristalning yutilishi (va lyuminessensiyasi)

spektrlaridagi optik o'tishlar identifikatsiyasining yuqorida keltirilgan qo'shimcha

olib keladi. Bu hol, 483 – 500 nm spektral diapazonda yozib olingan, nurlanishli o'tishlar bilan bog'liq  $TbF_3$  monokristalidagi fotolyuminessensiyaning havorang spektri keltirilgan 2 – rasmdan yaqqol ko'rinib turibdi. Kristal maydonda fluorid kristalidagi  $Tb^{3+}$  nodir yer ioni asosiy  $4f^{8}$  – konfiguratsiyasi multepleti uyg'otilgan  $5D_4$  Shtark sath ostilariga  $7F_6$  asosiy multepletning quyi sath ostilaridan o'tishlarga mos keluvchi optik yutilish chiziqlari 2 – rasmda keltirilgan va 2 ... 5 raqamlari orqali belgilangan. Qolgan yutilish

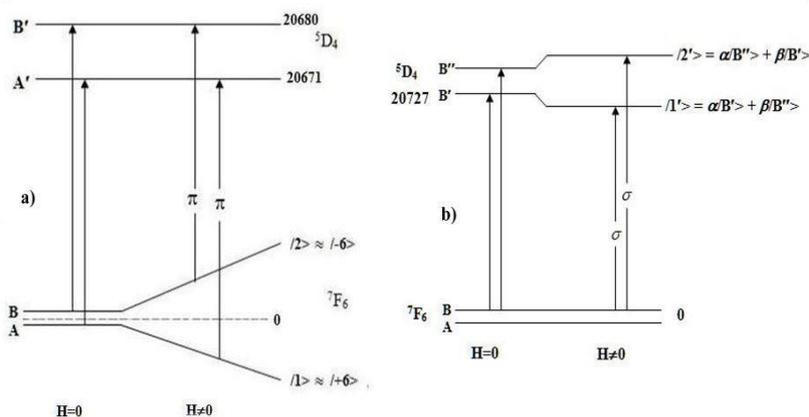


**4 – rasm.** [001] o'qi bo'ylab yorug'lik tarqalishida ortorombik kristalning [100] kristallografik o'qiqa parallel  $H = 7 kE$  (uzliksiz chiziqlar),  $6 kE$  (nuqta – nuqta chiziqlar) va  $0 kE$  (punktir chiziqlar) tashqi magnit maydonida  $T = 90 K$  temperaturada yozib olingan  $TbF_3$  dagi  $7F_6 \rightarrow 5D_4$  yutilish polosalari dublet chiziqlarida ( $\sim 20675 \text{ cm}^{-1}$ )  $\pi$  - tashkil etuvchisi Zeeman ajralishlarining spektral bog'lanishlari. Ilovada  $T = 90 K$  temperaturada yuqorida qarab chiqilgan  $H^2$  dublet chizig'idagi  $\Delta^2(H)$  ajralish kvadrati ajralish bog'lanishlari.

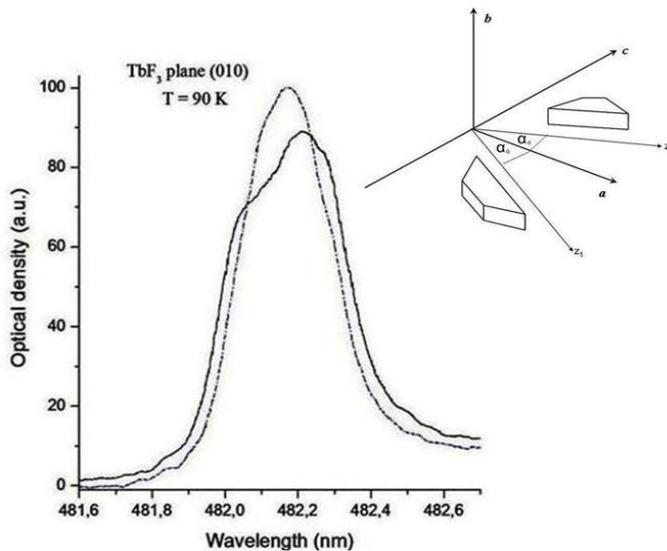
tasdig'i quyida keltirilgan TbF<sub>3</sub> ortorombik kristalidagi [001] va [010] kristallografik yo'nalishlari bo'ylab yorug'lik tarqalishida o'lchangan ko'ndalang Zeeman effektining eksperimental tadqiqotlari hisoblanadi.

4 – rasmda [001] o'qi bo'ylab yorug'lik tarqalishidagi ortorombik kristalning [100] kristallografik o'qiga paralel  $H = 7,5 \text{ kE}$  tashqi magnit maydonida  $T = 90 \text{ K}$  da yozilgan TbF<sub>3</sub> dagi  ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$  yutilish polosasining  $\pi$  - tashkil etuvchisi dublet chizig'i ( $\sim 20675 \text{ sm}^{-1}$ ) Zeeman ajralishlarining spektral bog'lanishlarini o'lchash natijalari keltirilgan. Aynan shu rasmda magnit maydon bo'lmagan holda olingan dublet chiziqlarining xuddi shu spektral bog'lanishlarini solishtirish maqsadida keltirilgan.

Bu keltirilgan rasmdan ko'rinadiki,  $T = 90 \text{ K}$  temperaturada [001]



6– rasm.  $H = 7 \text{ kE}$  magnit maydonidagi  $T = 90 \text{ K}$  temperaturada yutilish chiziqlarining  $\sim 20675 \text{ sm}^{-1}$  energiyali 2-3 (a) va  $20730 \text{ sm}^{-1}$  energiyali 1-chiziqlaridagi (b) Zeeman effektining paydo bo'lishiga olib keluvchi magnitoptik faol o'tishlar sxemasi.



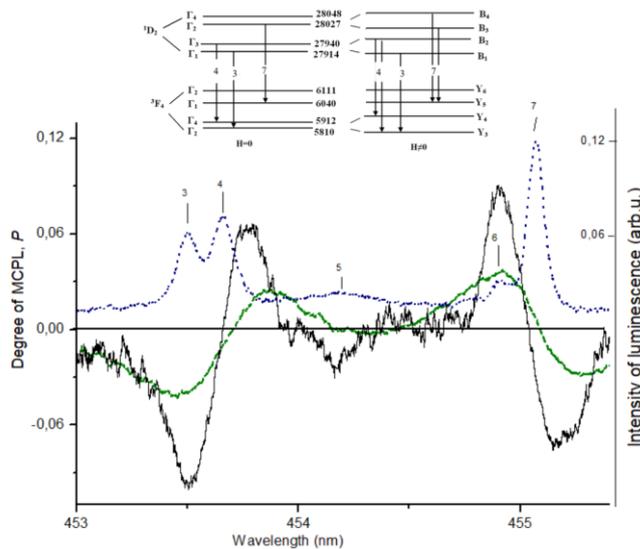
5 – rasm. Yorug'likning [010] o'qi bo'ylab tarqalishida ortorombik kristalning [001] kristallografik o'qiga paralel  $N = 7 \text{ kE}$  (tutash chiziq),  $0 \text{ kE}$  (nuqta-punktir chiziq), tashqi magnit maydonida  $T = 90 \text{ K}$  temperaturada TbF<sub>3</sub> kristalida  ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$  yutilish polosasidagi dublet chiziqlar ( $\sim 20730 \text{ sm}^{-1}$ )  $\sigma$  - tashkil etuvchisining Zeeman ajralishlari spektral bog'lanishlari. Ilovada ortorombik kristalning [001] kristallografik o'qiga ("c" o'qi) paralel,  $N = 7,5 \text{ kE}$  tashqi magnit maydonida triftorid terbiy kristlida a-b tekislikdagi ko'zgu tasviri bilan bog'liq nodir er ioni Tb<sup>3+</sup> ning ikki kristallografik ekvivalent holati (C<sub>s</sub> simmetriya) ning sxematik ko'rinishi keltirilgan.

kristallografik yo'nalishi bo'ylab chiziqli-qutblangan yorug'likning tarqalishi sharoitida  $\pi$  - qutblanishning,  $\sim 20675 \text{ sm}^{-1}$  yaqinida spektral sohada kuzatiladigan TbF<sub>3</sub> dagi yaxshi ruxsat etilgan  ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$  yutilish polosalari dublet chiziqlarida  $D = 10.7 \text{ sm}^{-1}$  ga teng dastlabki ajralishning kamayishiga olib keladi.

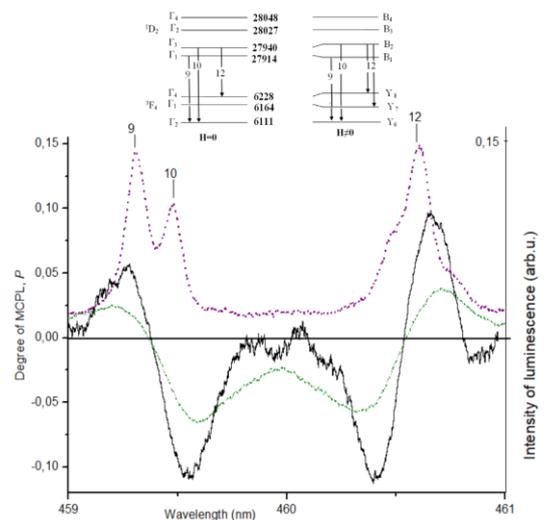
5-rasmda boshqa eksperiment geometriyasida, ya'ni TbF<sub>3</sub> kristalidagi a – b tekislikka perpendikulyar H

tashqi magnit maydoni bu magnit maydonda  ${}^7F_6$  multiplet asosiy kvazidublet holatini ajratmaydi va magnitoptik o'tishlar  ${}^7F_6$  multipletining asosiy kvazidubleti yo quyi A singletdan, yo V yuqori singletdan  $20730 \text{ cm}^{-1}$  energiya yaqinida lokallashgan  ${}^5D_4$  multipletining tashqi maydon bilan aralshgan kvazidublet holatlarini V', V'' (yoki A', A'') ga o'tishda sodir bo'ladi. (6-rasm) Bu holatda ushbu energiyada ko'rinadigan yutilish chizig'i kattaligi tashqi magnit maydon kuchlanganligi H ning ortishi bilan ortadigan Zeeman ajralishlariga duchor bo'ladi. Terbiy triftorid kristalining Zeeman effektining bunday oddiy bo'lmagan o'zini tutishi ushbu ishda  $C_s$  simmetriyaning Kristal qobig'ida nokramers NY ionlarining magnitlanishidagi o'ziga xos xususiyatlari bilan tushuntiriladi.

**“ $Tm^{3+}$ :YAG va EuGaG granatlari monokristallarining optik va magnitoptik xususiyatlari”** deb nomlangan to'rtinchi bobida 90 K va 300 K temperatura sharoitlarida spektrning ko'rinadigan sohasida  $Tm^{3+}$ :YAG granatning MSQL spektrlarining tadqiqot natijalari keltirilgan. 7-,8-va 9 rasmlarda  $T = 90 \text{ K}$  va  $T = 300 \text{ K}$  temperaturalarda  $H = 10 \text{ kE}$  tashqi magnit maydonida lyuminessensiyaning  ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_4$  (7-, 8 rasmlar) va  ${}^1G_4 \rightarrow {}^3H_6$  (9 - rasm) chiziqlarida o'lchangan tuliy – itriyli granat – alyuminat monokristallaridagi MSQL darajasi spektrlari keltirilgan.

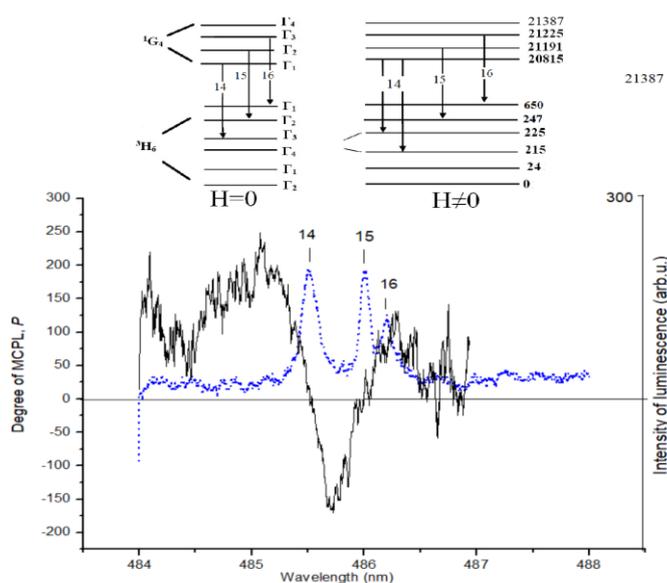


**7 -rasm.**  $T = 90\text{K}$  (qora) va  $T = 300 \text{ K}$  (yashil) temperaturalarda 453 – 456 nm to'liq uzunliklarida  ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_4$  nurlanishli o'tishlarda o'lchangan MSQL darajalari spektrlari. Lyuminessensiya spektrlari (nuqtalar)  $T = 90 \text{ K}$  temperaturada o'lchangan. Ilovada: tashqi magnit maydon bo'lmagan va maydon kuchlanganligi  $H=10 \text{ kE}$  bo'lgan hollarda  $Tm^{3+}$ :YaG da  $Tm^{3+}$  NY – ioni  ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_4$  multipletlari sath ostilari orasidagi optik o'tishlar sxemasi keltirilgan.



**8-rasm.**  $T = 90\text{K}$  (qora) va  $T = 300 \text{ K}$  (yashil) temperaturalarda 459 – 461 nm to'liq uzunliklarida  ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_4$  nurlanishli o'tishlarda o'lchangan MSQL darajalari spektrlari. Lyuminessensiya spektrlari (nuqtalar)  $T = 90 \text{ K}$  temperaturada o'lchangan. Ilovada: tashqi magnit maydon bo'lmagan va maydon kuchlanganligi  $H=10 \text{ kE}$  bo'lgan hollarda  $Tm^{3+}$ :YaG da  $Tm^{3+}$  NY – ioni  ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_4$  multipletlari sath ostilari orasidagi optik o'tishlar sxemasi keltirilgan.

4-, 7 - (7 - rasm), 12 - (8 - rasm) va 14- (9 - rasm) MSQL darajalari spektral bog'lanishlari chiziqli lyuminessensiya chiziqlari doirasida (chegaralarida) og'ma – chiziqli bog'lanishlarga approksimatsiya qilinishi mumkin. Ular uchun effekt kattaligi nolga (effekt ishorasini o'zgartirganda mos chiziqning “og'irlik markazi”ga) nisbatan simmetrik (yoki to'la nosimmetrik). 7- va 8- rasmlarda keltirilgan nurlanishli o'tishlar sxemasidan 4- va 12- chiziqlarning  $^1D_2$  multipleti  $V_2(\Gamma_3)$  sath ostidan 4- chiziq uchun  $Y_4(\Gamma_4)$ ,  $Y_3(\Gamma_2)$  yaqin joylashgan sath ostilariga va  $^3F_4$  multipletning 12- chiziq uchun  $Y_8(\Gamma_4)$ ,  $Y_7(\Gamma_1)$  sath ostilariga sodir bo'ladigan majburiy ruxsat etilgan optik o'tishlar bilan bog'liq ekan. Ayni damda, 7- rasmdagi 7- chiziq  $\Gamma_3$  simmetriyali  $^1D_2$  multipletining  $V_2$  Shtark sath ostidan  $^3F_4$  multipletning yaqin joylashgan  $Y_8(\Gamma_4)$  va  $Y_7(\Gamma_1)$  Shtark sath ostilarida sodir bo'luvchi ruxsat etilgan (simmetriya bo'yicha) optik o'tishlar (tufayli sodir bo'ladi) bilan asoslanadi. 7- chiziqdagi (7- rasm) MSQL darajalari spektral bog'lanishlarining o'ziga xos xususiyatlari  $^1D_2$  multipletining yaqin joylashgan  $V_4(\Gamma_4)$  va  $V_3(\Gamma_2)$  Shtark sath ostilaridan  $^3F_4$  multipletning  $Y_5(\Gamma_1)$  sath ostiga o'tishda sodir bo'ladigan ruxsat etilgan (simmetriya bo'yicha) optik o'tishlar yuzaga keladi.  $Tm^{3+}$ : YAG dagi  $Tm^{3+}$  NY ionining  $^1D_2$  va  $^3F_4$  multipletlari sath ostilari orasidagi optik o'tishlar 7 - va 8 - rasmlarda keltirilgan.



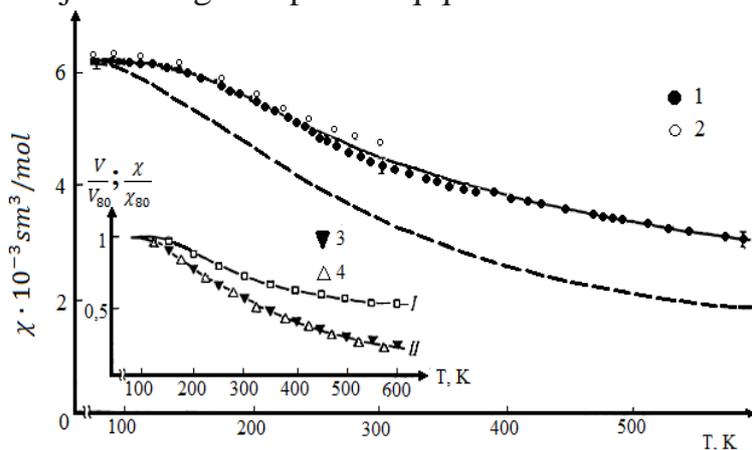
**9-rasm.**  $T = 90K$  (qora) va temperaturada 484 – 488 nm to'liq uzunliklarida  $^1G_4 \rightarrow ^3H_6$  nurlanishli o'tishlarda o'lgangan MSQL darajalari spektrlari. Lyuminessensiya spektri (nuqtalar)  $T = 90 K$  temperaturada o'lgangan. Ilovada: tashqi magnit maydon bo'lmagan va maydon kuchlanganligi  $H=10 kE$  bo'lgan hollarda  $Tm^{3+}$ : YaG da  $Tm^{3+}$  NY – ion  $^1G_4 \rightarrow ^3H_6$  multipletlari sath ostilari orasidagi optik o'tishlar sxemasi keltirilgan.

foydalanib, agar boshqa bittasining simmetriyasi ma'lum bo'lsa, magnitoptik o'tishlarda kombinatsiyalanuvchi holatlardan birining simmetriyasini o'rnatish qiyinchilik tug'dirmaydi.

$P(v)$  spektral bog'lanishning 12- nurlanish chizig'i lyuminessensiya (markazida effekt ishorasi almashinadigan) chiziqlari doirasida chegarasida) og'ma chiziqli bog'lanish hisoblanadi. Umumiy nazariya ko'ra  $P$  spektrning (MSQL darajalarining A - hadi) qiyalik kattaligi optik o'tishlarda kombinatsiyalanuvchi boshlang'ich va oxirgi holatlar sath ostilarining Zeeman ajralishlari tufayli yuzaga keladi: bu holda Zeeman ajralishlari tufayli  $^5D_1$  multiplet kvazidublet holati “singlet - kvazidublet” magnitofaol o'tadi. MSQL darajalari A – hadining ifodasida qatnashuvchi NY – ioning elektr va magnit dipol momentlari matrik elementlari tashkil etuvchilari uchun ma'lum tanlash qoidasidan(simmetriya bo'yicha)

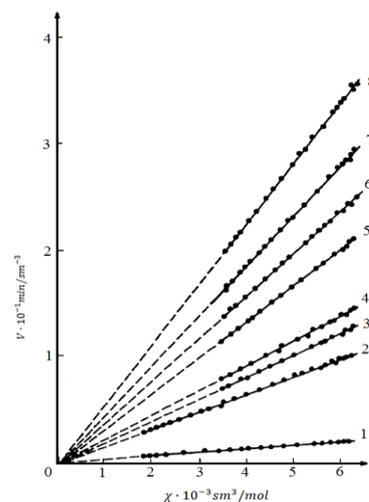
MSQL darajasining  $A'$  hadlari paydo bo'lishiga javobgar Zeeman ajralishlari 4 - va 12 - nurlanish chiziqlari (8- rasm) uchun nisbatan katta emas va ravishda  $\Delta E_{zeem.}^{eff.} = 0.16 sm^{-1}$  va  $\Delta E_{zeem.}^{eff.} = 1.01 sm^{-1}$  ga teng, hamda  $H = 9.5 kE$  tashqi maydonda  ${}^3N_6$  multipleti kvazidublet holati uchun 14 - chiziq (9 - rasm) uchun  $\Delta E_{zeem.}^{eff.} = 0.23 sm^{-1}$  ga teng. Bunda  ${}^1D_2$  multipleti kvazidublet holati "effektiv" ajralishi kattaligi "effektiv" ajralishi kattaligi  $\Delta E_{zeem.}^{eff.} = \frac{C'}{D_1} \mu_B H$  bo'lib, 7 - nurlanish chizig'ida nurlanishli "kvazidublet – yakkalangan singlet" o'tishlar uchun  $\Delta E_{zeem.}^{eff.} = 0.6 cm^{-1}$  ga teng. Keltirilgan 4 - va 12 - chiziqlarda MSQL darajalari spektrlarining o'ziga xos xususiyatlari  ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_4$  va  ${}^1G_4 \rightarrow {}^3H_6$  va  ${}^1G_4 \rightarrow {}^3F_3$  lyuminessensiya polosalarida  ${}^1D_2$  multipletning quyi qismida joylashgan aynan bir kvazidublet holatda sodir bo'luvchi nurlanishli o'tishlar bilan bog'liq.

Optik va magnitoptik tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki  $Tm^{3+}$  ionidagi  $4f \rightarrow 4f$  taqiqlangan o'tishlar tufayli hosil bo'ladigan lyuminessensiya polosalaridagi magnitoptik effektlar paydo bo'lishi mexanizimiga ko'ra energetik spektrlarda "kvazidublet" strukturaga ega bo'lib, bunda kvantomexanik "aralashish" effekti muhim rol o'ynaydi. Topilgan  $4f \rightarrow 4f$  o'tishlarning simmetriyali identifikatsiyasi natijalari magnitoptik tadqiqotlar kattaliklari bilan tasdiqlanadi.



**10 - Rasm.** Magnit kirituvchanlikning temperaturaga bog'liqligi  $\chi(t)$   $EuGaG$  Uzlukli chiziq – formula bo'yicha hisoblangan (1), 1 – eksperiment natijasi. Uzlukli chiziq  $\chi'(t)$  funksiyaning temperaturaga bog'liqligi formula bo'yicha hisoblangan (2) normallashtirilgan Verde doimiysi  $\frac{V}{V_{80}}$  (II) va normallashtirilgan magnit kirituvchanlikning  $\frac{\chi}{\chi_{80}}$  (I) temperaturaga bog'liqligi; (3) 1,15 va (4) 0,63 to'lqin uzunliklarida ( $\lambda$ , mkm)

10 – rasmda 80 – 600 K temperatura intervalida  $EuGaG$  granat magnit kirituvchanligining temperaturaviy bog'lanishlari keltirilgan. O'tkazilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki,  $EuGaG$  granatning magnit kirituvchanligi temperatura ortishi bilan kamayadi, bu kamayish 300 K dan yuqori temperatura amalda chiziqli bo'ladi.



**11– Rasm.** NY ioni  $Eu^{3+}$  ning Verde doimiysi  $V$  ning turli to'lqin uzunliklarida  $\chi$  funksiyaga bog'liqligi.

$$\chi = \chi_{vv}^{(0)} + (\chi_1 + \chi_2) + \chi_{vv}^{(1)} + \chi_{vv}^{(2)} \quad (1)$$

Formula asosida qurilgan *EuGaG* granat magnit kirituvchanligining nazariy bog'lanishlari uzluksiz chiziqlar yordamida mos ravishda ko'rsatib berildi,

$\chi_{vv}^{(0)}$  va  $\chi_{vv}^{(1)}$   ${}^7F_0$ ,  ${}^7F_1$  va  ${}^7F_1$ ,  ${}^7F_2$  multipletlar to'liqin funksiyasi "aralashishi" hisobiga magnit kirituvchanlikdagi hissalar hisoblanadi;  $(\chi_1 + \chi_2)$  -  ${}^7F_1$ ,  ${}^7F_2$ ; multipletlarning termik to'ldirilishi holatlari bilan bog'liq hissa;  $\chi_{vv}^{(2)}$   ${}^7F_3$  multiplet to'liqin funksiyalari bilan  ${}^7F_2$  multiplet to'liqin funksiyalarining aralashishi tufayli hosil bo'ladigan Van – Flek aralashishi hissasi.

Olingan bog'lanishlar tahlilidan ko'rinadiki, barcha temperatura diapazonida eksperimental aniqlanadigan va nazariy hisoblangan  $\chi$  magnit kirituvchanliklar eksperimental xatoliklar darajasiga bir – biriga mos kelgan 10 - rasmda 0.63 va 1.15 to'liqin uzunliklari uchun magnit kirituvchanligi va Verde doimiylarining temperaturaviy bog'lanishlari ko'rsatilgan. Yuqori temperaturalarda Verde doimiysi va magnit kirituvchanligining temperaturaviy bog'lanishlari yaqqol ko'rinadi.

$\text{Eu}^{3+}$  ioning Faradey effekti uchun olingan ifodadan  ${}^7F_0$  asosiy holatdan  $4f^n - {}^15d$  uyg'otilgan konfiguratsiyaga barcha ruxsat etilgan elektrodipol o'tishlar va  ${}^7F_0$ ,  ${}^7F_1$ ,  ${}^7F_2$  multipletlar va  ${}^7F_1$ ,  ${}^7F_2$  holatlar aralashishi to'liqin funksiyalari magnit kirituvchanligini quyidagi ko'rinishda ifodalash mumkin.

$$\chi' = \chi_{vv}^0 - \frac{1}{3}(\chi_1 + \chi_2) + \chi_{vv}^1 + \chi_{vv}^2 = \chi - \frac{4}{3}(\chi_1 + \chi_2) \quad (2)$$

10 - rasmda ikki formula asosida hisoblangan  $\chi'$  temperaturaviy bog'lanishlari keltirilgan (puktir chiziq) 85 - 300 K temperatura intervalida 400 - 700 nm to'liqin uzunligi spektral diapazonida FE metodida *EuGaG* granatida olib borilgan eksperimental tadqiqotlari, shuningdek 80 – 300 K temperatura diapazonida 0.63 va 1.15 mkm lazer to'liqin uzunliklarida o'lchangan Faradey aylanishlari tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, Verde doimiysining temperaturaviy bog'lanishi  $\chi'(t)$  funksiya orqali aniqlanadi

11 – rasmda ko'rinib turibdiki *EuGaG* granatidagi Verde doimiysining  $\chi'$  ning to'liqin uzunlikka bog'liqligi tajriba aniqligi doirasida chiziqli  $V(\chi)$  bog'lanish grafiqi koordinata boshidan o'tadi. Shuningdek *EuGaG* Verde doimiysining ushbu granat magnitlanishiga proporsional emasligi aniqlandi, uning temperaturaga bog'liqligi, ayniqsa yuqori temperaturalarda  $\chi'$  funksiyaga bog'liq ekan.

## XULOSALAR

Fizika matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) ilmiy darajasini olish uchun amalga oshirilgan « Tuliylar  $\text{Tm}^{3+}$ , Yevropiy  $\text{Eu}^{3+}$  va Terbiylar  $\text{Tb}^{3+}$  ionlari bilan faollashtirilgan ittriylar granat va ittriylar fluorid kristallarining magnitoptik va optik xossalari » mavzuidagi dissertatsiya ishi bo'yicha tadqiqotlar o'tkazildi va quyidagi xulosalarga kelindi:

1. Birinchi marta  $\text{TbF}_3$  kristaliga energiyasi ultrabinafsha sohasida joylashgan  $4f \rightarrow 4f$  va  $4f \rightarrow 5d$  o'tishlarning uyg'otilishi natijasida spektrning ko'rinadigan sohasida  ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_6$  va  ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$  emission taqiqlangan  $4f \rightarrow 4f$  o'tishlar bilan bog'liq

bo'lgan intensiv lyuminessensiya polosalarining paydo bo'lishiga olib kelishi ko'rsatildi.

2. 90 K temperatura sharoitida  $TbF_3$  kristalidagi  $Tb^{3+}$  ionning Shtark sath osti  $^5D_4 \rightarrow ^7F_6$  multipletlari orasidagi optik o'tishlar bilan bog'liq holda o'lchangan yutilish va fluoressensiya spektrlarini solishtirish asosida optik o'tishlar sxemasi tuzildi va sath ostilari energiyalari hamda ularning NY ioni multipletlaridagi kombinatsiyalanuvchi optik o'tishlarda joylashishlari aniqlandi.

3. Ilk marotaba  $TbF_3$  kristalida [001] kristallografik yo'nalish bo'ylab yorug'lik tarqalganda, [100] o'qiga parallel bo'lgan tashqi magnit maydoni 90 K температурада  $\pi$ -polyarizatsiyada yaxshi ajratilish bilan kuzatiladigan  $^7F_6 \rightarrow ^5D_4$  yutilish polosasining  $D = 10.7 \text{ sm}^{-1}$  ga teng bo'lgan dastlabki dublet chizigi ajralishining pasayishiga olib kelishi ko'rsatildi. Bunda bo'ylama maydonda  $^7F_6$  multipletining asosiy "kvazidublet" holati ajratilmaydi va yutilish chiziqlari esa kattaligi maydon kuchlanganligi oshishi bilan ortuvchi Zeeman ajralishlariga duchor bo'ladi va bu o'z navbatida  $C_s$  simmetriyali kristal qobiqda nokramers NY-ioni magnitlanishining o'ziga xos aniqlangan xususiyati hisoblanadi.

4. Birinchi marta magnit sirkulyar qutblanish lyuminessensiya spektral bog'lanishlari tahlili asosida  $Tm^{3+}:YaG$  tulliy-ittriyli granat-alyuminat monokristalida  $^1G_4 \rightarrow ^3H_6$ ,  $^1D_2 \rightarrow ^3F_4$  va  $^1D_2 \rightarrow ^3F_3$  lyuminessensiya polosalarida  $Tm^{3+}$  ionining uyg'otilgan  $^1D_2$ ,  $^3F_4$ ,  $^3G_4$  va asosiy  $^3H_6$  multipletlarida "kvaziaynigan" holatlar mavjudligi aniqlandi.

5. "Kvazidublet" tuzilishga ega bo'lgan  $Tm^{3+}$  nokramers ionidagi  $4f \rightarrow 4f$  o'tishlarning lyuminessensiya polosalaridagi magnetooptik effektlarning paydo bo'lishi mexanizmida kvant mexanik "aralashtirish" effekti muhim rol o'ynashi ko'rsatildi. Topilgan  $4f \rightarrow 4f$  o'tishlarining simmetrik identifikatsiya natijalari magnitooptik tadqiqotlarda olinga kattaliklar bilan tasdiqlandi.

6. Yevropiy-galliyli granat kristalida Faradey effektini tadqiq qilish asosida Verde doimiysining  $EuGaG$  granat magnit kirituvchanligiga proporsional emasligi aniqlandi.

**ДОКТОРА НАУК DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 ПРИ ИНСТИТУТЕ  
ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ АН РУз**  

---

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА ИМЕНИ МИРЗО  
УЛУГБЕКА**

**ТУРОТОВ ФУРКАТ КУЛДОШ ЎҒЛИ**

**МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
КРИСТАЛЛОВ ИТТРИЕВЫХ ГРАНАТОВ И ИТТРИЕВЫХ  
ФТОРИДОВ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ТУЛИЯ  $Tm^{3+}$  ЕВРОПИЯ  
 $Eu^{3+}$  И ТЕРБИЯ  $Tb^{3+}$**

**01.04.05 – Оптика**

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

**Ташкент–2025**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № В2023.2.PhD/FM889.

Диссертация выполнена в Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека..

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

**Научный руководитель:** **Валиев Уйгун Вахидович**  
доктор физико-математических наук, профессор.

**Официальные оппоненты:** **Эшчанов Баходир Худайбергенович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Рахимов Рахимберган Юлдашевич**  
доктор физико-математических наук, доцент

**Ведущая организация:** **Самаркандский государственный университет**

Защита диссертации состоится « 17 » июня 2025 года в 16:00 часов на заседании Научного совета **DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01** при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий. Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, дом 33. Здание института Ионно-плазменных и лазерных технологий, зал конференций. Тел./факс: (+99871) 262-32-54; email: [info@iplt.uz](mailto:info@iplt.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института Ионно-плазменных и лазерных технологий (зарегистрирована за № 8). Адрес: 100125, г.Ташкент, ул. Дурмон йули, дом 33. Здание Института ионно-плазменных и лазерных технологий, зал конференций. Тел./факс: (+99871) 262-31-69;

Автореферат диссертации разослан « 3 » июня 2025 г.  
(протокол рассылки № 8 от 3 июня 2025 г )



*[Handwritten signature]*

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

*[Handwritten signature]*

**Ядгаров И. Д.,**  
Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

*[Handwritten signature]*

**Махманов У.К.,**  
Председатель научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**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 проявляющихся во внешнем магнитном поле  $H$ .

Уникальные физико-химические свойства фторидных редкоземельных соединений и редкоземельных соединений на основе иттрий алюминиевого граната обуславливают их применение в качестве материала, применяемого при создании твердотельных лазеров, легирующих добавок в производстве ряда оптических материалов сенсоров, работающих в ультрафиолетовом, видимом и среднем инфракрасном диапазонах, оптико-волоконных световодов, концентраторов солнечной энергии.

Этот интерес обусловлен тем обстоятельством, что единственным источником возникновения магнитооптических эффектов, также как и магнитного момента в полностью невырожденных электронных состояниях некрамерсовского РЗ – ионов  $Tm^{3+}$ ,  $Tb^{3+}$  и  $Eu^{3+}$  может быть лишь механизм «смешивания» (внешним полем) волновых функций близлежащих штарковских синглетов, образующих так называемые «квазидублетные» состояния. Поэтому новые исследования спектров излучения  $Tm^{3+}:YAG$  и  $TbF_3$ , проведенные с использованием дифференциальных магнитооптических методов (эффект Зеемана, магнитная циркулярная поляризация люминесценции), были бы очень полезны, так как их применение может помочь в позиционировании и определении симметрии близлежащих (т. е. «квазивырожденных») Штарковских подуровней в некрамерсовских ионах  $Tm^{3+}$ .

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных Указом Президента Республики Узбекистан от 8 октября 2019 года № УП-5847 "Об утверждении Концепции развития системы высшего образования Республики Узбекистан до 2030 года," Постановлениями Президента Республики Узбекистан от 29 декабря 2020 года № ПП-5032 "О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики" и другими нормативно-правовыми документами, принятыми в данной сфере.

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

### Степень изученности проблемы.

На сегодняшний день в научном мире присутствует значительный интерес к фундаментальным исследованиям магнитооптики редкоземельных магнитных диэлектриков, поскольку они дают возможность решать фундаментальные проблемы физики магнитных явлений в твердых телах. За последние 10-15 лет появилось большое количество публикаций, посвященных магнитооптике и оптике редкоземельных соединений.

Кристалл трифторида тербия  $TbF_3$  орторомбической симметрии (пространственная группа  $P_{nma}$ ) при низкой температуре демонстрирует широкий спектр магнитных, оптических и магнитооптических свойств. Например, в парамагнитном (по существу) кристалле трифторида тербия ферромагнитное упорядочение магнитных моментов  $Tb^{3+}$  было неожиданно обнаружено при исследовании температурной зависимости магнитной восприимчивости и удельной теплоемкости в орторомбических кристаллах ( $T_C = 3,95$  К), в отличие от антиферромагнитного упорядочения, которое обычно наблюдается при низкой температуре ( $T_N \sim 3,8$  К) в кристаллах ромбической симметрией, допированных РЗ-ионами. Кроме того, в оптическом отношении кристалл  $TbF_3$  рассматривается как “квазиодноосный кристалл” с оптической осью, не совпадающей ни с одной кристаллографической осью орторомбической структуры ( $a, b, c$ ), что и делает магнитооптические исследования (такие как измерения угла вращения Фарадея и т.п.) в этих анизотропными кристаллами очень сложными и трудоемкими. В этом контексте более предпочтительными могут оказаться исследования зеемановского расщепления электронных состояний ионов в магнитных полях, приложенных вдоль различных кристаллографических направлений кристалла трифторида. Благодаря использованию вышеупомянутого экспериментального подхода в настоящее время были выполнены исследования расщепления Зеемана на эмиссионном переходе  $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$  в кристалле  $TbF_3$  при  $T = 90$  К во внешнем магнитном поле  $H = 7,5$  кОе. Магнитные характеристики “квазидублетных” состояний (т.е. “случайные” дублеты) некрамерсовского иона  $Tb^{3+}$ , рассчитанные с использованием электростатического потенциала внутрикристаллического поля, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Также была построена схема штарковского расщепления мультиплетов  $^7F_5$  и  $^5D_4$  иона  $Tb^{3+}$  в изоструктурных матрицах кристаллов  $TbF_3$ ,  $YF_3$ ,  $GdF_3$  и  $DyF_3$ . Но поскольку в существующих работах идентификация симметрии штарковских подуровней мультиплетов ионов  $Tb^{3+}$  не проводилась, это обстоятельство послужило мотивирующим фактором для проведения дополнительного экспериментального исследования. Спектры поглощения и люминесценции  $Tm^{3+}:YAG$  были подробно изучены в видимой и ближней инфракрасной областях при различных температурах (включая низкие) J.V.Gruber *et al.* Лазерное возбуждение оптических переходов использовалось для исследования спектров излучения, возникающих при переходах из состояния  $^1D_2$  в  $^3H_6$ ,  $^3F_4$ ,  $^3F_3$  и  $^3F_2$  мультиплеты. Хотя эти данные и дали информацию, подтверждающую кристалл-полевое расщепление

большинства мультиплетов (т.е.  $J, L, S$ -состояний) принадлежащих основной  $4f^{(n)}$ -конфигурации иона  $Tm^{3+}$  в структуре граната, а также, информацию о симметрии Штарковских подуровней данных мультиплетов, мы считаем, что полученные ранее энергетические спектры иона  $Tm^{3+}$  в структуре граната-алюмината должны быть дополнены путем включения в них соответствующих "квазидублетных" состояний. Вышеуказанные противоречия, обнаруженные при исследовании и интерпретации оптических и магнитных свойств исследуемых редкоземельных соединений и явились мотивирующими факторами для постановки данной исследовательской работы.

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.** Тема диссертационной работы непосредственно связана с фундаментальными исследованиями, проводимыми в настоящее время в НУУз по г/б теме: «Оптические исследования конденсированных сред». Часть результатов получена при выполнении научного проекта Национального Университета Узбекистана по теме: ФЗ-202009143 «Управление оптическими характеристиками оксидных и фторидных кристаллов, активированных редкоземельными элементами, с помощью магнитного поля (2022-2026).

**Целью исследования** является проведение экспериментальных исследований оптических и магнитооптических свойств редкоземельных ионов в структурах гранатов и трифторидов, с целью обнаружения «квазидублетных  $Tb^{3+}$ ,  $Tm^{3+}$  и  $Eu^{3+}$ » состояний в энергетическом спектре редкоземельных трехвалентных ионов в низкосимметричном кристаллическом окружении.

**Задачи исследования:**

- Экспериментальное исследование оптических спектров кристалла  $TbF_3$  в видимой области спектра с целью идентификации запрещенных в электродипольном приближении  $4f \rightarrow 4f$  оптических переходов и определения энергий штарковских подуровней мультиплетов  $^5D_4$  и  $^7F_6$ , комбинирующих в исследуемых переходах.

- Экспериментальное исследование эффекта Зеемана в кристалле  $TbF_3$  в линейно-поляризованном свете, распространяющемся вдоль кристаллографических осей кристалла  $[001]$  (ось «с») и  $[010]$  (ось «b») при  $T = 90$  К.

- Экспериментальное исследование спектров вторичного свечения кристалла  $Tm^{3+}:YAG$  в видимой области спектра с целью симметричной

идентификации штарковских подуровней мультиплетов  $^3F_4$ ,  $^1G_4$ ,  $^1D_2$  и  $^3H_6$  в кристаллическом окружении симметрии  $D_2$

- Из результатов рассмотрения низкотемпературных спектров степени МЦПЛ кристалла  $Tm^{3+}:YAG$  ионов  $Tm^{3+}$  определить наличие квазидублетных состояний (и их энергий) в энергетическом спектре мультиплетов  $^3F_4$ ,  $^1D_2$  и  $^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$ , находящихся в кристаллическом окружении симметрии  $D_2$

- На основе магнитооптических измерений провести расчет зеемановского расщепления квазидублетных состояний мультиплетов  $^3F_4$ ,  $^1D_2$  и  $^3H_6$  иона ионов  $Tm^{3+}$  кристалла  $Tm^{3+}:YAG$ .

- На основе температурных зависимостей константы Верде в ЭФ и магнитной восприимчивости исследовать характер зависимости константы Верде монокристалла  $EuGaG$  от магнитной восприимчивости.

### **Предметом исследования**

Магнитооптические свойства (МКД и МЦПЛ), наблюдаемые при приложении внешнего магнитного поля, основанные на оптических свойствах (поглощение и люминесценция) кристаллов  $TbF_3$  и  $Tm^{3+}:YAG$ .

**Объект исследования:** объектами исследований явились монокристаллы тербиевого трифторида, иттрий алюминиевого граната с ионами туллия и европий –галлиевый гранат.

**Методы исследований.** В экспериментальных исследованиях были использованы методы дифференциальной магнитооптики - МЦПЛ и эффект Зеемана. Измерения оптических свойств осуществлялись на основе исследований спектров оптического поглощения, спектров флуоресценции и спектров возбуждения люминесценции (СВЛ). Метод модулированной поляризации светового потока, выходящего из намагниченного образца; метод синхронного детектирования, использованный в электронной схеме регистрации вышедшего из оптической схемы сигнала; математические и вычислительные методы обработки экспериментальной информации и др.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

-Впервые из анализа оптических спектров кристалла  $TbF_3$  показано, что возбуждение как  $4f \rightarrow 4f$ , так и  $4f \rightarrow 5d$  переходов, чьи энергии располагаются в УФ-области спектра приводит к возникновению интенсивных полос люминесценции в видимой области спектра, связанных с эмиссионными запрещенными (в электродипольном приближении)  $4f \rightarrow 4f$  переходами:  $^5D_4 \rightarrow ^7F_6$  и  $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ .

- Впервые на основе сопоставления измеренных спектров флуоресценции и поглощения кристалла  $TbF_3$ , связанных с оптическими переходами происходящими между штарковскими подуровнями мультиплетов  $^5D_4$  и  $^7F_6$  иона  $Tb^{3+}$  при 90 К построена схема оптических переходов и определена энергия подуровней и их расположение в комбинирующих в оптических переходах мультиплетах  $P_3$ -иона.

- Впервые на основе исследования эффекта Зеемана показано, что при распространении линейно-поляризованного света вдоль кристаллографической направления  $[001]$  при направлении внешнего магнитного поля параллельно оси  $[100]$  приводит к уменьшению исходного

расщепления равно  $D = 10.7 \text{ см}^{-1}$  хорошо разрешенной дублетной линии полосы поглощения  ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$  в  $\text{TbF}_3$ . В другой экспериментальной геометрии, внешнее поле  $H$  в кристалле  $\text{TbF}_3$  не расщепляет состояния основного «квазидублета» мультиплета  ${}^7F_6$ . Линия поглощения, наблюдаемая при энергии  $20730 \text{ см}^{-1}$ , испытывает зеемановское расщепление, величина которого возрастает с увеличением напряженности внешнего магнитного поля  $H$ , что связано с особенностями намагничивания некрамерсовского РЗ-иона в кристаллическом окружении  $C_S$  – симметрии.

- Впервые на основе анализа спектральных зависимостей магнитооптических (МЦПЛ) и оптических (люминесценция) эффектов монокристалла тулий-иттриевого граната-алюмината  $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$  было установлено наличие «квазивырожденных» состояний возбужденных мультиплетов  ${}^1D_2$ ,  ${}^3F_4$ ,  ${}^3G_4$  и основного мультиплета  ${}^3H_6$  РЗ-иона  $\text{Tm}^{3+}$  в гранате-алюминате  $\text{YAG}$  в полосе люминесценции  ${}^1G_4 \rightarrow {}^3H_6$ ,  ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_4$  и  ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_3$ . Показано, что механизме возникновения магнитооптических эффектов на полосах люминесценции, обусловленных «запрещенными»  $4f \rightarrow 4f$  переходами в некрамерсовском ионе  $\text{Tm}^{3+}$ , существенную роль играет эффект квантовомеханического «смешивания».

- Впервые, на основе исследования эффекта Фарадея в кристалле европий-галлиевого граната было установлено, что константа Верде в  $\text{EuGaG}$  не пропорциональна восприимчивости этого граната.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем: создание на базе полученных оптических и магнитооптических свойств РЗ-гранатов различных магнитооптических устройств, таких как:

-модуляторы светового излучения, оптические изоляторы, дисплеи, функционирующих в видимой и УФ-областях спектра ;

- использование исследованных РЗ-соединений в качестве активных и пассивных элементов в фотонике и рентгеновских сцинтилляторах, активных сред в генераторах видимого диапазона с использованием стандартной оптической накачки;

использование исследованных РЗ-соединений в качестве эффективных оптических изоляторов в мощных лазерных системах.

**Научная и практическая значимость результатов исследования** заключается в получении информации о тонкой структуре энергетического спектра исследуемых редкоземельных ионов  $\text{Tb}^{3+}$  и  $\text{Tm}^{3+}$  в кристаллических полях симметрии  $C_S$  и  $D_2$ . А также, в возможности определения различных механизмов магнитооптической активности, которые влияют на величину магнитооптических эффектов. Полученные экспериментальные результаты позволяют рассчитать величины Зеемановских расщеплений участвующих в магнитооптических переходах подуровнях мультиплетов.

Результаты поляризационно-оптических и магнитооптических исследований свидетельствуют о том, что кристаллы содержащие другие редкоземельные ионы (такие, как  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$  и  $\text{Eu}^{3+}$ ) перспективны в качестве сред для лазеров видимого и среднего ИК-диапазона, которые находят широкое практическое применение в медицинских технологиях, биологии,

для раз личных лидарных систем. Кристаллы семейства  $TbF_3$  содержат большое количество ионов  $R^{3+}$  в матрице и могут использоваться как активные и пассивные элементы в оптике и фотонике. Кристаллы  $TbF_3$  благодаря высокой величине магнитного момента ионов  $Tb^{3+}$  являются перспективным материалом для магнитооптики и исследования магнетизма.

**Достоверность результатов исследования** заключается в возможности сопоставления полученных экспериментальных данных с данными, полученными с помощью теоретических расчетов. Обосновывается проведением параллельных измерений и сопоставлением данных других исследователей, использованием современных методов регистрации и обработки спектральных зависимостей при проведении магнитооптических исследований.

**Внедрение результатов исследования.** Методы исследования оптических, магнитооптических и энергетических спектров ионов редкоземельных элементов, их магнитооптические свойства, а также результаты расчета величин энергий энергетических уровней ионов в кристаллических полях различной симметрии использовались при решении научно-технических задач в рамках фундаментального Узбекско-Индийского проекта № Uzb-Ind-2021-78 «Термоэлектрические свойства и процессы самоорганизации в силикатах, легированных оксидами металлов» (Справка Национального университета Узбекистана №-01/11-2954 от 25-февраля 2025 года). Применение научных результатов позволяет изучать структурные переходы по оптическим свойствам в нанокристаллах, образующихся при легировании силикатного стекла оксидами металлов, по оптическим свойствам, определять влияние оптических свойств легированного силикатного стекла на коэффициент термоЭЮК, определять электрическую проводимость ионов редкоземельных металлов ( $La_2O_3$ ,  $Nd_2O_3$ ) в легированном силикатном стекле и их влияние на коэффициент термоЭЮК.

Основное применение результатов исследования представлено цитированием полученных результатов, экспериментальных и модельных исследований в научных статьях, опубликованных в журналах с высоким импакт-фактором и индексируемых в научных базах данных Web of Science и Scopus:

**Апробация результатов исследования.** Результаты данного исследования обсуждены на 5 международных и республиканских конференциях.

**Опубликованность результатов.** По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 5 научные статьи, 3 из них в международных научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертации доктора философии(PhD).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 112 страницы.

## 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 «Магнитные и оптические свойства фторидных кристаллов  $TbF_3$  и кристаллов гранатов с ионами  $Tm^{3+}$  и  $Eu^{3+}$ »** имеющей обзорный характер, приведены достаточно подробные сведения о кристаллографических, магнитооптических, оптических и магнитных свойствах редкоземельных ионов  $Tb^{3+}$ ,  $Tm^{3+}$  и  $Eu^{3+}$  в кристаллах парамагнитных гранатов и трифторидов.

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

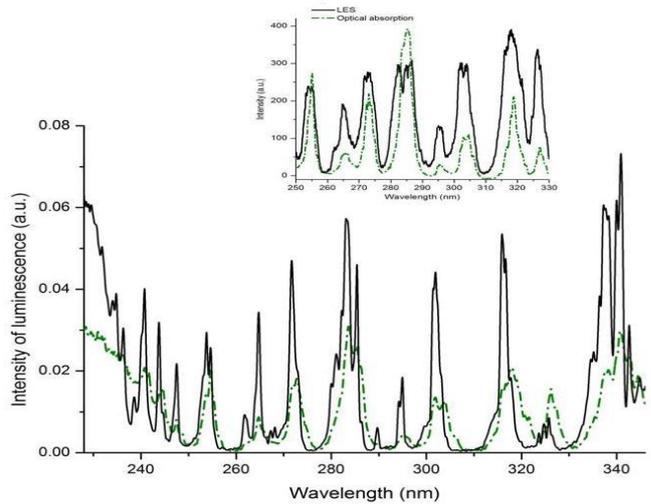
Монокристаллы гранатов  $Tm^{3+}:YAG$  и  $EuGaG$ , на которых проводились экспериментальные исследования, был выращен методом спонтанной кристаллизации из «раствора-расплава» в Физическом институте Технического Университета в Германии. Исследуемый образец, содержащий ~ 1% ионов  $Tm^{3+}$ , рентгенографически ориентировался и вырезался в кристаллографических плоскостях типа  $[110]$  и  $[001]$

Монокристаллы  $TbF_3$  были выращены в институте кристаллографии имени Шубникова (Россия) из расплава методами направленной кристаллизации. При проведении оптических, магнитооптических исследований использовались следующие экспериментальные установки:

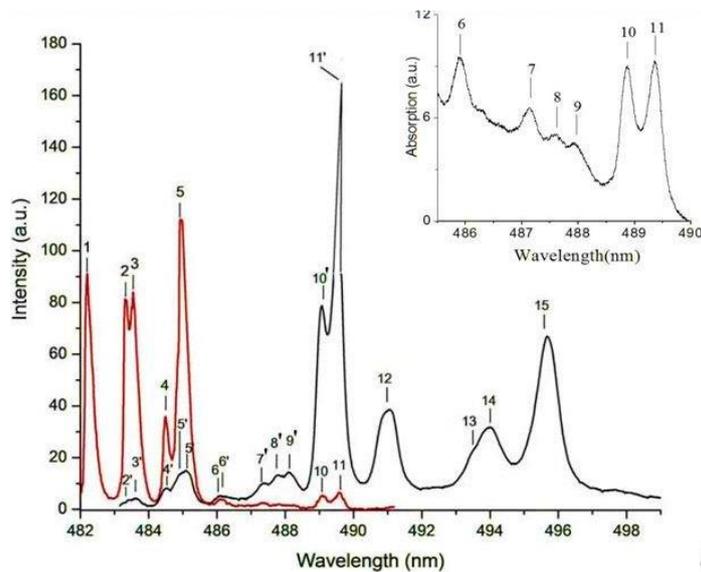
1. Установка для измерения спектров МЦПЛ
2. Установка для измерения спектров люминесценции
3. Установка для измерения спектров МКД
4. Установка для измерения эффекта Зеемана

**В третьей главе «Особенности зеемановского расщепления электронных состояний редкоземельного иона в кристаллах  $TbF_3$ »** приведены результаты исследования оптических спектров кристалла  $TbF_3$  и эффекта Зеемана. Из полученных данных следует, что в спектральной области 240 – 340 нм в спектре спектра возбуждения люминесценции (СВЛ) наблюдаются узкие эмиссионные линии запрещенных (в электродипольном приближении)  $4f \rightarrow 4f$  переходов, что подтверждается сопоставлением спектра СВЛ со спектром поглощения кристалла  $TbF_3$ , записанным в той же спектральной области (см. также вставку к **Рис 1**).

Ниже 230 нм начинается область интенсивного оптического УФ-поглощения, приводящая к резкому уменьшению и искажению формы спектра СВЛ, по-видимому, обусловленного реабсорбцией излучения разрешенным (по спину и по четности) электродипольным (ЭД) переходом  $4f^{(8)} \rightarrow 4f^{(7)}5d$  в ионах  $Tb^{3+}$ . Возбуждение  $4f \rightarrow 4f$  и  $4f \rightarrow 5d$  переходов, чьи энергии располагаются в УФ - области спектра приводит к возникновению люминесценции, связанной с эмиссионными запрещенными (в электродипольном приближении) переходами  $4f \rightarrow 4f$ . Это хорошо видно на Рис.2, где приведен спектр «голубой» ФЛ монокристалла  $TbF_3$ , связанной с излучательным переходом, записанный в спектральном диапазоне 483 – 500 нм. Линии оптического поглощения



**Рис 1.** Спектр возбуждения люминесценции (СВЛ), записанный в плоскости (100) при  $T = 25$  К (сплошная линия) и 300 К (точки-пунктир). Длина волны наблюдения  $\lambda = 542.2$  nm. Вставка: сравнение СВЛ (сплошная линия) со спектром поглощения (точки-пунктир) при  $T = 300$  К.

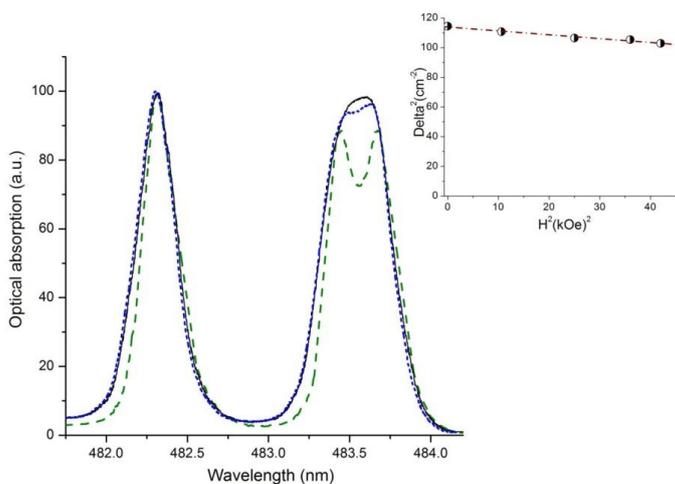


**Рис 2.** Оптические спектры - поглощения и люминесценции (показаны черным цветом), измеренные при низкой температуре (90 К) в трифториде тербия вдоль кристаллографической оси [001] орторомбического кристалла. Соответствующие обозначения, используемые в характеристиках оптических спектров, приведены в тексте.

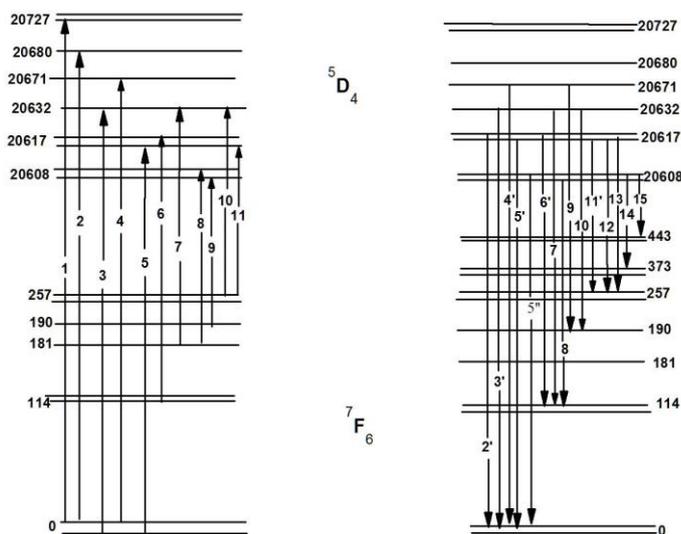
соответствующие переходам из нижних (по энергии) подуровней основного мультиплета  ${}^7F_6$  вращенные кристаллическим полем (КП) шарковские подуровни возбужденного мультиплета основной  $4f^{(8)}$  - конфигурации редкоземельного (РЗ) иона  $Tb^{3+}$  в кристалле фторида, и приведенные на Рис 2 обозначены цифрами - 2, .....5. Оставшиеся линии поглощения, обозначенные цифрами от 6 и выше, соответствуют оптическим переходам из высокоэнергетических подуровней мультиплета  ${}^7F_6$  на подуровни возбужденного мультиплета и показаны

отдельно на вставке к Рис. 2, вследствие их малой интенсивности.

Сопоставление измеренных спектров флуоресценции и поглощения, связанных с оптическими переходами происходящими между штарковскими подуровнями мультиплетов  $^5D_4$  и  $^7F_6$  иона  $Tb^{3+}$  при 90 К, позволяет построить схему оптических переходов приведенную на Рис. 3 и определить энергии подуровней и уточнить их. Дополнительным подтверждением корректности проведенной выше идентификации оптических переходов в спектрах поглощения (и люминесценции) исследуемого



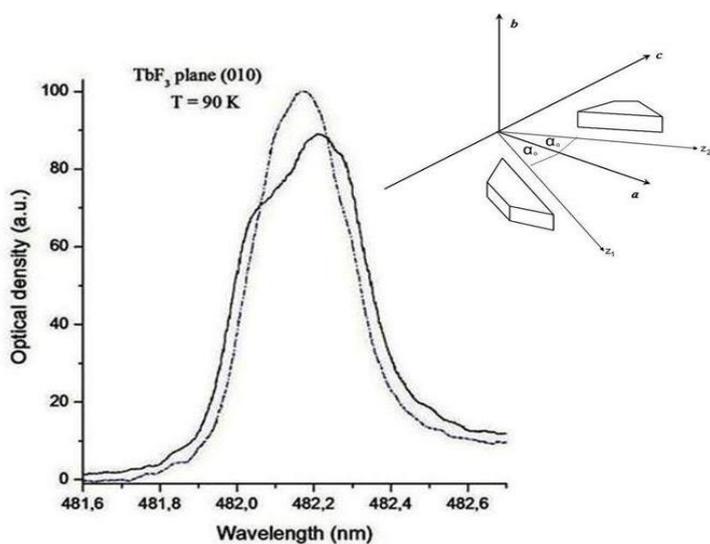
**Рис 4.** Спектральные зависимости зеемановского расщепления  $\pi$ -компонент дублетной линии (при  $\sim 20675 \text{ см}^{-1}$ ) полосы поглощения  $^7F_6 \rightarrow ^5D_4$  в  $TbF_3$ , записанные при  $T = 90 \text{ К}$  во внешнем магнитном поле:  $H = 7 \text{ кОе}$  (сплошная),  $6 \text{ кОе}$  (точки) and  $0 \text{ кОе}$  (пунктир), параллельном кристаллографической оси  $[100]$  орторомбического кристалла при распространении света вдоль оси  $[001]$ ; 7. На вставке: зависимость квадрата расщепления  $\Delta^2(H)$  рассматриваемой выше дублетной линии от  $H^2$  при  $T = 90 \text{ К}$ .



**Рис 3.** Приведены схемы оптических переходов, происходящих между штарковскими компонентами мультиплетов  $^7F_6$  и  $^5D_4$  иона  $Tb^{3+}$  в кристалле  $TbF_3$  при  $T = 90 \text{ К}$ . Поглощательные переходы приведены слева, а люминесцентные переходы - справа на рисунке.

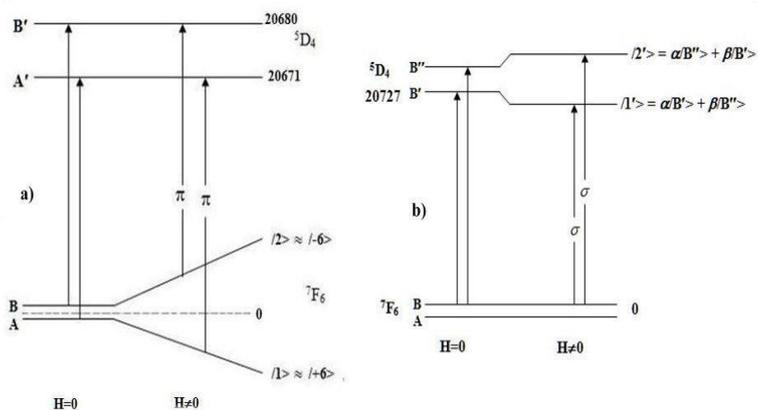
кристалла служит проведенное ниже экспериментальное исследование поперечного эффекта Зеемана измеренного при распространении света вдоль кристаллографических направлений  $[001]$  и  $[010]$  орторомбического кристалла  $TbF_3$ .

На Рис.4 приведены результаты измерений спектральных зависимостей зеемановского расщепления  $\pi$ -компонент дублетной линии (при  $\sim 20675 \text{ см}^{-1}$ ) полосы поглощения  $^7F_6 \rightarrow ^5D_4$  в  $TbF_3$ , записанные при  $T = 90 \text{ К}$  во внешнем магнитном поле  $H = 7,5 \text{ кОе}$ , параллельного кристаллографической оси  $[100]$  орторомбического кристалла при распространении света вдоль оси  $[001]$ .



**Рис 5.** Спектральные зависимости зеемановского расщепления  $\sigma$ -компонент дублетной линии (при  $\sim 20730 \text{ см}^{-1}$ ) полосы поглощения  ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$  в кристалле  $\text{TbF}_3$ , записанные при  $T = 90 \text{ K}$  во внешнем магнитном поле:  $H = 7 \text{ kOe}$  (сплошная),  $0 \text{ kOe}$  (точки-пунктир), параллельном кристаллографической оси  $[001]$  орторомбического кристалла при распространении света вдоль оси  $[010]$ . Вставка: представлено схематическое описание двух кристаллографически-неэквивалентных положений (симметрия  $C_s$ ) РЗ-ионов  $\text{Tb}^{3+}$ , связанных зеркальным отражением в плоскости  $a$ - $b$  в кристалле трифторида тербия.

внешнее поле  $H$  перпендикулярное плоскости  $a$ - $b$  в кристалле  $\text{TbF}_3$  не расщепляет состояния основного «квазидублета» мультиплета  ${}^7F_6$  (рис.5) во внешнем поле  $H$  и магнитооптические переходы происходят либо из нижнего синглета  $A$ , либо из верхнего синглета  $B$  основного «квазидублета»  ${}^7F_6$  мультиплета в смешиваемые внешним полем «квазидублетные» состояния  $B'$ ,  $B''$  (либо  $A'$ ,  $A''$ ) мультиплета  ${}^5D_4$  локализованные вблизи энергии  $20730 \text{ см}^{-1}$  (рис.6.).



**Рис 6.** Схемы магнитооптически-активных переходов ответственных за возникновение эффекта Зеемана на линиях поглощения - 2 и - 3 при  $\sim 20675 \text{ см}^{-1}$  (а) и линии - 1 при  $20730 \text{ см}^{-1}$  (б) при  $T = 90 \text{ K}$  в магнитном поле  $H = 7 \text{ kOe}$ .

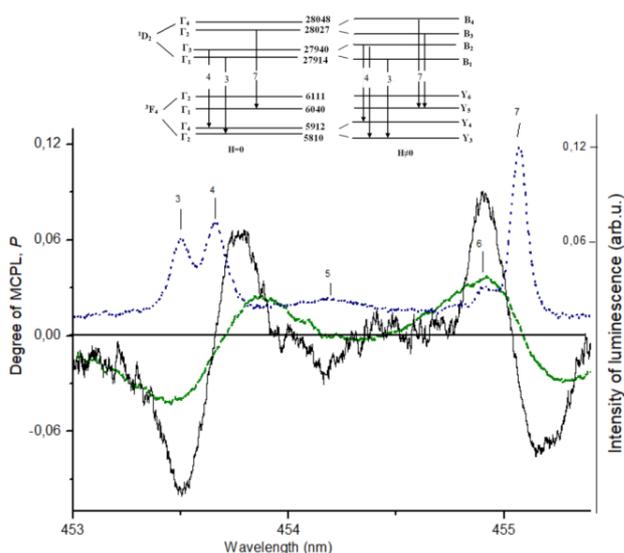
Для сравнения на этом же рисунке приведена запись спектральной зависимости компонент той же дублетной линии, полученной в отсутствие внешнего магнитного поля.

Из приведенного рисунка следует, что влияние внешнего магнитного поля параллельного оси  $[100]$  приводит к уменьшению исходного расщепления равного  $D = 10.7 \text{ см}^{-1}$  хорошо разрешенной дублетной линии полосы поглощения  ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$  в  $\text{TbF}_3$ , наблюдаемой в спектральной области в  $\pi$ -поляризации вблизи  $\sim 20675 \text{ см}^{-1}$  при распространении линейно-поляризованного света вдоль кристаллографической направления  $[001]$  при  $T = 90 \text{ K}$ .

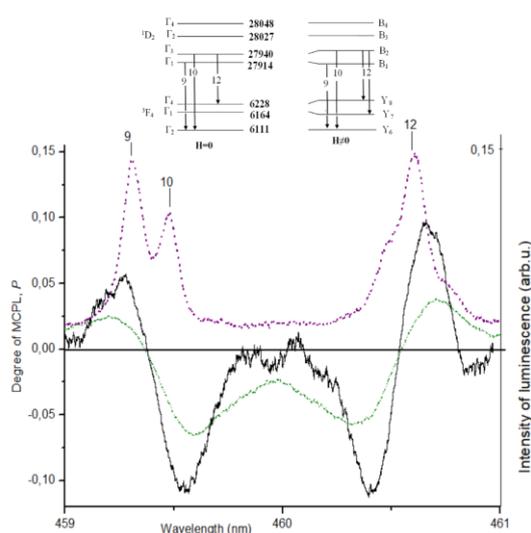
В другой экспериментальной геометрии, в которой

В этом случае линия поглощения, наблюдаемая при энергии, испытывает зеемановское расщепление, величина которого возрастает с увеличением напряженности внешнего магнитного поля  $H$ . Подобное нетривиальное поведение эффекта Зеемана в кристалле трифторида тербия объяснено в работе своеобразными особенностями намагничивания некрамерсовского РЗ-иона в кристаллическом окружении  $C_S$  – симметрии.

**В четвертой главе «Магнитооптические свойства монокристаллов гранатов  $Tm^{3+}:YAG$  и  $EuGaG$ »** приведены результаты исследования спектров МЦПЛ граната  $Tm^{3+}:YAG$  в видимой области спектра при температурах 90 К и 300К. На рис. 7, рис.8 и рис.9 приведены спектры степени МЦПЛ в монокристалле туллий-иттриевого граната-алюмината, измеренные на линии люминесценции  $^1D_2 \rightarrow ^3F_4$  (рис. 7, рис.8) и на линии люминесценции  $^1G_4 \rightarrow ^3H_6$  (рис 9) при  $T=300K$  и  $T=90 K$  во внешнем магнитном поле  $H = 10$  кОэ.



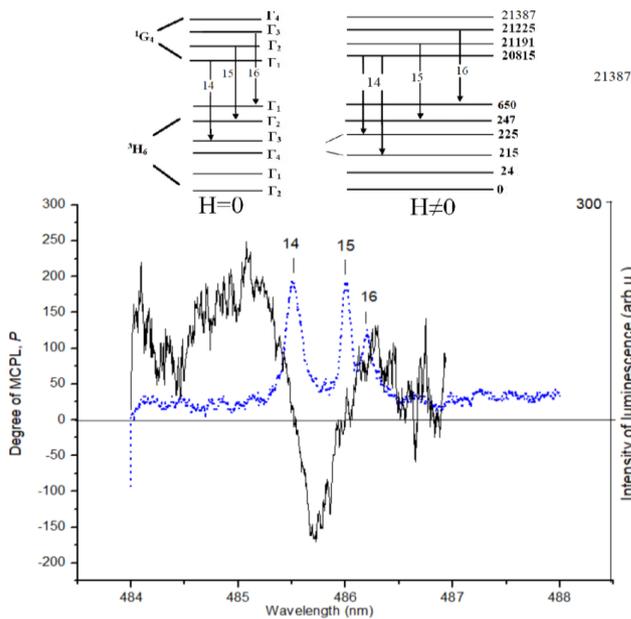
**Рис. 7.** Спектры степени МЦПЛ, измеренные на излучательных переходах  $^1D_2 \rightarrow ^3F_4$  в интервале длин волн 455-456 нм при  $T = 90$  К (черная) и 300 К (зеленая). Спектры люминесценции (точки) измерены при 90 К. На вставке приведена схема оптических переходов между подуровнями мультиплетов  $^1D_2$  и  $^3F_4$  РЗ-иона  $Tm^{3+}$  в  $Tm^{3+}:YAG$  при отсутствии внешнего магнитного поля и при  $H=10$  кОэ.



**Рис. 8.** Спектры степени МЦПЛ, измеренные на излучательных переходах  $^1D_2 \rightarrow ^3F_4$  в интервале длин волн 459-461 нм при  $T = 90$  К (черная) и 300 К (зеленая). Спектры люминесценции (точки) измерены при 90 К. На вставке приведена схема оптических переходов между подуровнями мультиплетов  $^1D_2$  и  $^3F_4$  РЗ-иона  $Tm^{3+}$  в  $Tm^{3+}:YAG$  при отсутствии внешнего магнитного поля и при  $H=10$  кОэ.

На линиях 4, - 7 (рис.7), - 12 (рис.8) и -14 (рис.9) спектральная зависимость степени МЦПЛ может быть аппроксимирована наклонными линейными зависимостями в пределах линии люминесценции, для которых величина эффекта симметрична (либо несимметрична) относительно нуля (при смене знака эффекта в «центрах тяжести» соответствующей линии). Причем из схем излучательных переходов, приведенных на рис. 7 и рис.8 следует что линии - 4 и - 12 связаны с разрешенными (по симметрии в группе  $D_2$ ) вынужденными оптическими переходами, происходящими с

подуровня  $B_2(\Gamma_3)$  мультиплета  ${}^1D_2$  на близлежащие штарковские подуровни  $Y_4(\Gamma_4)$ ,  $Y_3(\Gamma_2)$  для линии -4 и на подуровни  $Y_8(\Gamma_4)$ ,  $Y_7(\Gamma_1)$  для линии -12 мультиплета  ${}^3F_4$ . В то же время, линия -7 на рис.7 обусловлена разрешенными (по симметрии) оптическими переходами, происходящими с штарковского подуровня  $B_2$  мультиплета  ${}^1D_2$  с симметрией  $\Gamma_3$  на близлежащие штарковские подуровни  $Y_8(\Gamma_4)$  и  $Y_7(\Gamma_1)$  мультиплета  ${}^3F_4$ . В то же время, особенность спектральной зависимости степени МЦПЛ на линии -7 (рис.7) обусловлена разрешенными (по симметрии) оптическими переходами, происходящими с близлежащих штарковских подуровней  $B_4(\Gamma_4)$  и  $B_3(\Gamma_2)$  мультиплета  ${}^1D_2$  на подуровень  $Y_5(\Gamma_1)$  мультиплета  ${}^3F_4$ .



**Рис. 9.** Спектры степени МЦПЛ, измеренные на излучательных переходах  ${}^1G_4 \rightarrow {}^3H_6$  в интервале длин волн 459-461 нм при  $T = 90$  К (черная). Спектры люминесценции (точки) измерены при 90 К. На вставке приведена схема оптических переходов между подуровнями мультиплетов  ${}^1G_4 \rightarrow {}^3H_6$  РЗ-иона  $Tm^{3+}$  в  $Tm^{3+}:YAG$  при отсутствии внешнего магнитного поля и при  $H=10$  кОе.

состояния мультиплета  ${}^5D_1$  в магнитооптически-активном переходе «синглет  $\rightarrow$  квазидублет». Используя известные правила отбора (по симметрии) для матричных элементов компонент электрического и магнитного дипольных моментов РЗ-иона, фигурирующих в выражении для  $A$  - члена степени МЦПЛ, нетрудно установить симметрию одного из комбинирующих состояний в магнитооптическом переходе, если симметрия другого известна. Зеemanовские расщепления, ответственные за возникновение  $A'$ -членов степени МЦПЛ, оказываются относительно небольшими и равными соответственно  $\Delta E_{зеem}^{эфф} = 0.16 cm^{-1}$  и  $\Delta E_{зеem}^{эфф} = 1.01 cm^{-1}$  для линий излучения - 4 и -12 (рис.8) и  $\Delta E_{зеem}^{эфф} = 0.23 cm^{-1}$  для линии -14 (рис.9) для квазидублетных

Схема оптических переходов между подуровнями мультиплетов  ${}^1D_2$  и  ${}^3F_4$  РЗ-иона  $Tm^{3+}$  в  $Tm^{3+}:YAG$  приведена на вставках к рис.7 и рис.8. На линии излучения - 1 2 Актуальность и востребованность темы диссертационной спектральной зависимость  $P(\nu)$  представляет собой наклонную линейную зависимость в пределах линии люминесценции (со сменой знака эффекта в ее центре). Согласно общей теории,

величина наклона спектра -  $P$  ( $A$  - член степени МЦПЛ) обусловлена зеemanовским расщеплением подуровней конечного и начального состояний, комбинирующих в оптическом переходе; в данном случае - зеemanовским расщеплением квазидублетного

состояний мультиплета  ${}^3H_6$  во внешнем поле  $H = 9.5$  кОе. При этом величина «эффективного» расщепления  $\Delta E_{зем.}^{эфф.} = \frac{C'}{D_1} \mu_B H$  квазидублетного состояния мультиплета  ${}^1D_2$  для излучательных переходов «квазидублет – изолированный синглет» на линии излучения - 7 составило  $\Delta E_{зем.}^{эфф.} = 0.6 \text{ см}^{-1}$ .

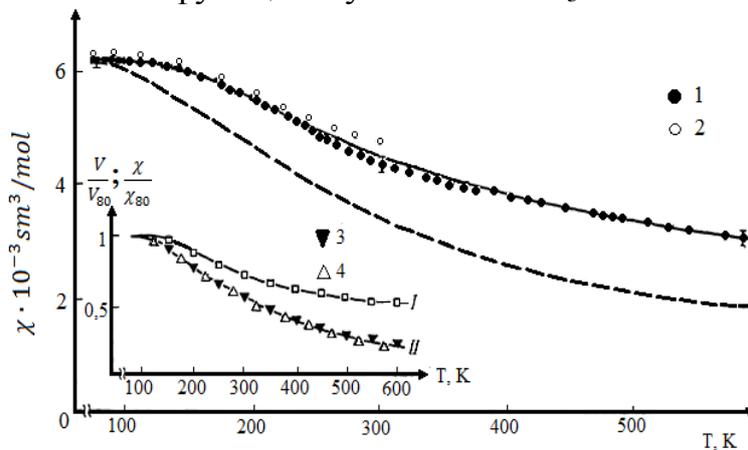
Особенности спектров степени МЦПЛ на приведенных линиях 12 и 4 связаны с излучательными переходами, происходящими из одного и того же квазидублетного состояния, лежащего в нижней части мультиплета  ${}^1D_2$ . полосе люминесценции  ${}^1G_4 \rightarrow {}^3H_6$ ,  ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_4$  и  ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_3$ .

Анализ данных оптических и магнитооптических исследований показывают, что в механизме возникновения магнитооптических эффектов на полосах люминесценции, обусловленных «запрещенными»  $4f \rightarrow 4f$  переходами в некрамерсовском ионе  $\text{Tm}^{3+}$ , который имеет «квазидублетную» структуру в энергетических спектрах, существенную роль играет эффект квантовомеханического «смешивания». Результаты симметричной идентификации найденных  $4f \rightarrow 4f$  переходов подтверждаются данными магнитооптических исследований.

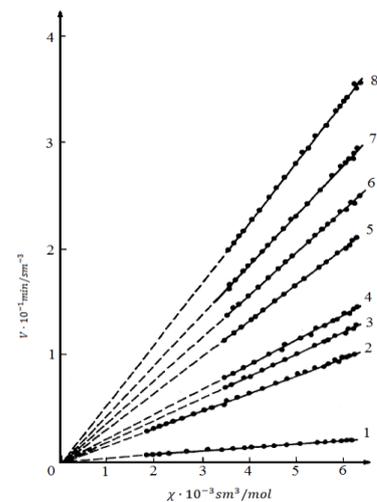
Проведенные исследования показывают, что магнитная проницаемость граната  $\text{EuGaG}$  уменьшается с ростом температуры, причем это снижение практически линейно в интервале температур выше 300 К. Сплошными линиями показаны теоретические зависимости магнитной восприимчивости граната  $\text{EuGaG}$ , построенные на основе формулы:

$$\chi = \chi_{vv}^{(0)} + (\chi_1 + \chi_2) + \chi_{vv}^{(1)} + \chi_{vv}^{(2)} \quad (1)$$

$\chi_{vv}^{(0)}$  и  $\chi_{vv}^{(1)}$  – вклады в восприимчивость за счет «перемешивания» волновых функций мультиплетов  ${}^7F_0$ ,  ${}^7F_1$  и  ${}^7F_1$ ,  ${}^7F_2$  соответственно;  $(\chi_1 + \chi_2)$  – вклад, связанный с состояниями термического заселения мультиплета  ${}^7F_1$ ,  ${}^7F_2$ ;  $\chi_{vv}^{(2)}$  – вклад смешивания Ван-Флека, возникающий за счет смешивания волновых функций мультиплета  ${}^7F_3$  с волновыми функциями мультиплета  ${}^7F_2$



**Рис. 10.** Представлены температурные зависимости магнитной восприимчивости граната  $\text{EuGaG}$  в диапазоне температур 80 - 600 К.



**Рис. 11.** Зависимость постоянной Верде  $V$  РЗ ионов  $\text{Eu}^{3+}$  от функции  $\chi$  для разных длин волн.

Из анализа полученных зависимостей видно, что во всех диапазонах температур экспериментальная и теоретически рассчитанная зависимости  $\chi$  соответствуют друг другу в пределах погрешностей эксперимента. На рисунке 10 показаны температурные зависимости постоянной Верде и магнитной проницаемости для длин волн 0,63 и 1,15 мкм. Температурная зависимость магнитной восприимчивости и константы Верде особенно заметны при высоких температурах.

Из выражения для эффекта Фарадея иона  $\text{Eu}^{3+}$  с учетом всех разрешенных электродипольных переходов из основного состояния  ${}^7F_0$  конфигурации  $4f^n$  в возбужденную конфигурацию  $4f^{n-1}5d$ , с учетом волновых функций мультиплетов  ${}^7F_0$ ,  ${}^7F_1$ ,  ${}^7F_2$  и смешивания состояний  ${}^7F_1$ ,  ${}^7F_2$  возможно представить магнитную восприимчивость в следующем виде:

$$\chi' = \chi_{vv}^0 - \frac{1}{3}(\chi_1 + \chi_2) + \chi_{vv}^1 + \chi_{vv}^2 = \chi - \frac{4}{3}(\chi_1 + \chi_2) \quad (2)$$

На рисунке 10 представлена температурная зависимость магнитной восприимчивости  $\chi'$ , рассчитанная по формуле (2) (пунктирная линия). Приведенные результаты экспериментальных исследований граната  $\text{EuGaG}$  методом ЭФ, полученных в спектральном диапазоне 400-700 в диапазоне температур 85 - 300 К, а также измерения фарадеевских вращений на длинах волн лазеров 0,63 и 1,15 мкм в диапазоне температур 80 - 300 К показывают (рис 11), что температурная зависимость постоянной Верде этого граната определяется функцией  $\chi'(t)$ .

Из рисунка 11 видно, что зависимость константы Верде  $\text{EuGaG}$  граната  $\chi'$  от всех длин волн в пределах точности эксперимента линейна, а график связи  $V(\chi)$  проходит через начало координат. Было установлено, что константа Верде в  $\text{EuGaG}$  не пропорциональна намагниченности этого граната, а его температурная зависимость при высоких температурах зависит от функции  $\chi'$ .

## Выводы

1. Впервые показано, что возбуждение как  $4f \rightarrow 4f$ , так и  $4f \rightarrow 5d$  переходов в кристалла  $TbF_3$ , чьи энергии располагаются в УФ-области спектра, приводит к возникновению интенсивных полос люминесценции в видимой области спектра, связанных с эмиссионными запрещенными  $4f \rightarrow 4f$  переходами:  ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_6$  и  ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ .

2. Впервые на основе сопоставления измеренных спектров флуоресценции и поглощения кристалла  $TbF_3$ , связанных с оптическими переходами происходящими между штарковскими подуровнями мультиплетов  ${}^5D_4$  и  ${}^7F_6$  иона  $Tb^{3+}$  при 90 К, построена схема оптических переходов и определена энергия подуровней и их расположение в комбинирующих переходах мультиплетах РЗ-иона.

3. Впервые показано, что при распространении света вдоль кристаллографического направления  $[001]$  внешнее магнитное поле, параллельное оси  $[100]$ , приводит к уменьшению исходного расщепления, равного  $D = 10.7 \text{ см}^{-1}$ , хорошо разрешенной дублетной линии полосы поглощения  ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$  в  $TbF_3$ , наблюдаемой в  $\pi$ -поляризации при  $T=90 \text{ К}$ . При этом в продольном поле состояние основного «квазидублета» мультиплета  ${}^7F_6$  не расщепляется, а линия поглощения испытывает зеемановское расщепление, возрастающее с увеличением напряженности поля, что является обнаруженной особенностью намагничивания некрамерсовского РЗ-иона в кристаллическом окружении  $C_s$  – симметрии.

4. Впервые на основе анализа спектральных зависимостей магнитной циркулярно-поляризованной люминесценции монокристалла тулий-иттриевого граната-алюмината  $Tm^{3+}:YAG$  было установлено наличие «квазивырожденных» состояний возбужденных мультиплетов  ${}^1D_2$ ,  ${}^3F_4$ ,  ${}^3G_4$  и основного мультиплета  ${}^3H_6$  иона  $Tm^{3+}$  в полосе люминесценции  ${}^1G_4 \rightarrow {}^3H_6$ ,  ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_4$  и  ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_3$ .

5. Показано, что в механизме возникновения магнитооптических эффектов на полосах люминесценции  $4f \rightarrow 4f$  переходов в некрамерсовском ионе  $Tm^{3+}$ , который имеет «квазидублетную» структуру, существенную роль играет эффект квантовомеханического «смешивания». Результаты симметричной идентификации найденных  $4f \rightarrow 4f$  переходов подтверждаются данными магнитооптических исследований.

6. Впервые, на основе исследования эффекта Фарадея в кристалле европий-галлиевого граната было установлено, что константа Верде в  $EuGaG$  не пропорциональна восприимчивости этого граната.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 ON AWARD OF  
SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF ION-PLASMA AND  
LASER TECHNOLOGIES**

---

**NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN NAMED AFTER MIRZO  
ULUG‘BEK**

**TUROTOV FURKAT KULDOSH O‘G‘LI**

**MAGNETO-OPTICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF YTTRIUM  
GARNET AND YTTRIUM FLUORIDE CRYSTALS ACTIVATED BY  
THULIUM  $Tm^{3+}$  EUROPIUM  $Eu^{3+}$  AND TERBIUM  $Tb^{3+}$  IONS**

**01.04.05 – Optics**

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

16:00  
Tashkent – 2025

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Higher Education, Science & Innovation of the Republic of Uzbekistan under number № B2023.2.PhD/FM889

Dissertation has been prepared at the National university of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at [www.iplt.uz](http://www.iplt.uz) and on the website of "Ziyonet" information-educational portal at [www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)

**Scientific supervisor:**

**Valiev Uygun Vaxidovich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Official opponents:**

**Eshchanov Baxodir Xudayberganovich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Raximov Raximbergan Yuldashevich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior researcher

**Leading organization:**

**Samarkand State University**

The defence of the dissertation will be held on " 17 " June 2025, at 16:00 at the meeting of the Scientific Council number DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 at the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (Address: 33 Durmon yuli str., 100125 Tashkent. Tel./Fax: (+99871) 262-32-54, e-mail: [info@iplt.uz](mailto:info@iplt.uz)).

The dissertation can be looked through in the Information Resource Centre of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (registered under No 8 ). Address: 33 Durmon yuli str., 100125 Tashkent. Tel./Fax: (+99871) 262-31-69.

The abstract of dissertation was distributed on " 3 " june 2025  
(Registry record No 8 dated " 3 " june 2025



**Kh.B. Ashurov**

Chairman of scientific council on award of scientific degrees, Doctor of Technical Science, professor.

**I.D. Yadgarov**

Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, Doctor Physical and Mathematical Science, professor.

**U.K. Maxmanov**

Chairman of scientific seminar under scientific Council on award of scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Science, professor.

## INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

**Aim of the research work.** The aim is to conduct experimental studies of the optical and magneto-optical properties of rare earth ions in the structures of garnets and trifluorides, in order to detect "quasi-doublet  $Tb^{3+}$ ,  $Tm^{3+}$  and  $Eu^{3+}$ " states in the energy spectrum of rare earth trivalent ions in a low-symmetric crystalline environment.

### Study objectives:

1) An experimental study of the optical spectra of a  $TbF_3$  crystal in the visible region of the spectrum in order to identify optical transitions forbidden in the  $4f \rightarrow 4f$  electro-dipole approximation and determine the energies of the Stark sublevels of the  $^5D_4$  and  $^7F_6$  multiplets combining in the studied transitions.

2) Experimental study of the Zeeman effect in a  $TbF_3$  crystal in linearly polarized light propagating along the crystallographic axes of the crystal [001] ("c" axis) and [010] ("b" axis) at  $T = 90$  K.

3) Experimental study of the secondary luminescence spectra of a  $Tm^{3+}$ :YAG crystal in the visible spectral region in order to symmetrically identify the Stark sublevels of  $^3F_4$ ,  $^1G_4$ ,  $^1D_2$  and  $^3H_6$  multiplets in a crystalline environment of  $D_2$  symmetry

4) From the results of consideration of the low-temperature spectra of the degree of MCPL of the  $Tm^{3+}$  crystal:YAG of  $Tm^{3+}$  ions, determine the presence of quasi-doublet states (and their energies) in the energy spectrum of the  $^3F_4$ ,  $^1D_2$  and  $^3H_6$  multiplets of  $Tm^{3+}$  ions located in the crystalline environment of symmetry  $D_2$

5) On the basis of magneto-optical measurements, to calculate the Zeeman splitting of the quasi-doublet states of the  $^3F_4$ ,  $^1D_2$  and  $^3H_6$  multiplets of the  $Tm^{3+}$  ions of the  $Tm^{3+}$  crystal:YAG.

6) Based on the temperature dependences of the Verde constant in EF and magnetic susceptibility, to investigate the nature of the dependence of the Verde constant of the EuGaG single crystal on magnetic susceptibility.

**Objects of the research work.** The objects of research were single crystals of terbium trifluoride, yttrium aluminum garnet with thulium ions and europium-gallium garnet.

### The scientific novelty of the study is as follows.

-For the first time, it was shown from the analysis of the optical spectra of a  $TbF_3$  crystal that the excitation of both  $4f \rightarrow 4f$  and  $4f \rightarrow 5d$  transitions, whose energies are located in the UV region of the spectrum, leads to the appearance of intense luminescence bands in the visible region of the spectrum associated with emission forbidden (in the electro-dipole approximation)  $4f \rightarrow 4f$  transitions:  $^5D_4 \rightarrow ^7F_6$  and  $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ .

- For the first time, based on a comparison of the measured fluorescence and absorption spectra of a  $TbF_3$  crystal associated with optical transitions occurring between the Stark sublevels of the  $^5D_4$  and  $^7F_6$  multiplets of the  $Tb^{3+}$  ion at 90 K, a scheme of optical transitions was constructed and the energy of the sublevels and their location in the RH ion multiplets combining in optical transitions were determined.

- For the first time, based on the study of the Zeeman effect, it was shown that the propagation of linearly polarized light along the crystallographic direction [001] with the direction of an external magnetic field parallel to the axis [100] leads to a decrease in the initial splitting equal to  $D = 10.7 \text{ cm}^{-1}$  of the well-resolved doublet line of the absorption band  ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$  in  $\text{TbF}_3$ . In another experimental geometry, the external field  $H$  in the  $\text{TbF}_3$  crystal does not split the states of the main "quasi-doublet" of the  ${}^7F_6$  multiplet. The absorption line observed at an energy of  $20730 \text{ cm}^{-1}$  undergoes Zeeman splitting, the magnitude of which increases with an increase in the intensity of the external magnetic field  $H$ , which is associated with the peculiarities of magnetization of the non-Kramers RH ion in a crystalline environment of  $C_s$  symmetry.

- For the first time, based on the analysis of the spectral dependences of magneto-optical (MCPL) and optical (luminescence) effects of a single crystal of thulium-yttrium garnet-aluminate  $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$ , the presence of "quasi-degenerate" states of excited  ${}^1D_2$ ,  ${}^3F_4$ ,  ${}^3G_4$  multiplets and the main  ${}^3H_6$  multiplet of the  $\text{Tm}^{3+}$  RH ion in YAG garnet-aluminate in the luminescence band was established  ${}^1G_4 \rightarrow {}^3H_6$ ,  ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_4$  and  ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_3$ . It is shown that the mechanism of magneto-optical effects on luminescence bands caused by "forbidden"  $4f \rightarrow 4f$  transitions in the non-Kramers  $\text{Tm}^{3+}$  ion plays a significant role in the effect of quantum mechanical "mixing".

- For the first time, based on the study of the Faraday effect in a europium-gallium garnet crystal, it was found that the Verdet constant in  $\text{EuGaG}$  is not proportional to the susceptibility of this garnet.

**Publication of the research results.** On the topic of the dissertation, 10 scientific works were published, including 5 scientific papers, 5 of them in international scientific journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of the dissertation of a Doctor of Philosophy (PhD).

**Structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of Introduction, four Chapters, Conclusion and List of references. The dissertation volume is 112 pages.

**E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I bo'lim ( I часть; I part)**

- 1A. Valiev U.V., Karimov D.N., Brik M.G., Ma C.G., Vildanov R.R., Turotov F.K., Pelenovich V.O., Zeeman splitting features of electronic states of rare earth ions in TbF<sub>3</sub> crystal // Optical Materials, 2021, 111141  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111141> (Scopus) IF 3,8.
- 2A. Valiev, U. V., Malysheva M. E., Pelenovich V.O., Ramazanov A. X., Turotov F.K., Karimov D.N., Magneto-Optics of Dy 3+ Ion in Low – Symmetric Orthoaluminate Structure // Crystallography Reports, 2023, Vol. 68, No. 7, pp. 176–185. DOI: 10.1134/S1063774523600710 (Scopus) IF 0,6.
- 3A. Furkat K. Turotov., Mariya E. Malysheva., Ramil R. Vildanov., Magneto - optics features of radiation transitions of non-kramers Tm<sup>3+</sup> ion in yttrium-aluminum garnet crystals // EAST EUROPEAN JOURNAL OF PHYSICS. 2024 4,pp. 341 - 348
- 4A. Валиев У.В., Вильданов Р.Р, Малышева М., Туротов Ф.К., Вклад 4f→5d переходов в магнитооптику иона Dy<sup>3+</sup> в структуре ортоалюмината.. // «Узбекский физический журнал», 2024, Том 26, 2 , 163–170. DOI: <https://doi.org/10.52304/v26i2.519>
- 5A. Валиев У., Вильданов Р., Туротов Ф., Особенности Зеемановского расщепления электронных состояний редкоземельных ионов в кристаллах TbF<sub>3</sub> ЎЗМУ ХАБАРЛАРИ, Toshkent 2022, 3/2/1

**II bo'lim ( II часть; II part)**

- 6A. Туротов Ф.К., Соатов Х., Особенности зеемановского расщепления электронных состояний редкоземельных ионов Tb<sup>3+</sup> в кристаллах трифторида тербия // International scientific conference of young scientists "Science and innovation - 2022" Ташкент, 2022 – pp. 361-362.
- 7A. Малышева М.Е., Туротов Ф.К., Исследование эффекта зеемана в кристалле TbF<sub>3</sub> // “Fizika fanining rivojida iste'dodli yoshlarning o'rni” Respublika ilmiy-amaliy konferensiya (RIAK-XVII-2024) 283-285.
- 8A. Вильданов Р.Р., Туротов Ф.К., Особенности оптических свойств редкоземельных ионов в орторомбических кристаллах // Proceedings of International Conference Fundamental and applied research in physics 24-25-may, Toshkent 2024-yil. pp. 34-36.
- 9A. Малышева М.Е., Туротов Ф.К., Поглощение и люминесценция TbF<sub>3</sub> в видимой области спектра // Proceedings of International Conference Fundamental and applied research in physics 24-25-may, Toshkent 2024-yil. pp. 59 - 61.
- 10A. Вильданов Р.Р., Малышева М.Е., Туротов Ф.К., Казиева А.М., Магнитооптика некрамерсовского рз-иона Tm<sup>3+</sup> в кристаллах иттрий - алюминиевого граната // IX Международная научная конференция «Современные проблемы физики» Душанбе, 11-12 октября 2024 года pp. 46-51.